



**HOLOEXPO 2022**  
science & practice

**XIX** Международная конференция по голографии  
и прикладным оптическим технологиям

**20-22 сентября 2022 г.**  
Санкт-Петербург, Россия

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**



# HOLOEXPO 2022

ХІХ международная конференция  
по голографии и прикладным  
оптическим технологиям

Санкт-Петербург, 20–22 сентября 2022 г.

## Тезисы докладов

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1  
ББК 22.343.4  
Г60

Г60 HOLOEXPO 2022 : XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Санкт-Петербург, 20–22 сентября) : Тезисы докладов / Общество с ограниченной ответственностью «Оптико-голографические приборы». — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — 451 с.

ISBN 978-5-00202-182-6

Представлены тезисы докладов XIX международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO Science & Practice 2022 (Санкт-Петербург, 20–22 сентября 2022 г.) по следующим тематикам: современные тенденции развития голографии и прикладных оптических технологий, управление параметрами лазерного излучения, лазерные технологии в микрооптике, нанофотонике и структурированном свете, дифракционные и голографические оптические элементы и их применения, корреляционная и сингулярная оптика, оптические системы визуализации и отображения информации, технологии цифровой голографии и литографии, интерферометрия и метрология, оптическая обработка информации, оптические защитные технологии, фоточувствительные материалы, динамическая голография, микрооптика и метаматериалы, фазовая визуализация и цифровая микроскопия, новые прикладные оптические технологии, системы мульти- и гиперспектральной визуализации.

## НОЛОЕХРО 2022

### XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям

#### Генеральный спонсор



#### Бронзовые спонсоры



АО «НТЦ «Атлас»  
Москва, Россия



ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»  
Минск, Республика Беларусь



ООО «ХолоГрэйт»  
Санкт-Петербург, Россия



АО «НПО «ГИПО»  
Казань, Россия



ГОЗНАК

АО «Гознак»  
Москва, Россия

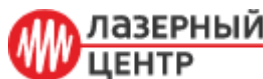
#### Партнеры



ООО «АОС»  
Москва, Россия



ООО «Джеймс Ривер Бранч»  
Москва, Россия



ООО «Лазерный Центр»  
Санкт-Петербург, Россия



АВЕСТА  
ЛАЗЕРЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ООО «Авеста-Проект»  
Троицк, Москва, Россия



ООО «Оптико-голографические приборы»  
Москва, Россия

## Программный комитет HOLOEXPO Science & Practice

Председатель программного комитета **Владимир Юрьевич Венедиктов**, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

Заместитель председателя программного комитета **Леонид Викторович Танин**, доктор физико-математических наук, академик Международной инженерной академии, председатель Совета директоров ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Республика Беларусь

**Геннадий Николаевич Вишняков**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия.

**Григорий Исаевич Грейсух**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия.

**Надежда Константиновна Павлычева**, доктор технических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия.

**Николай Владимирович Петров**, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории цифровой и изобразительной голографии, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

**Виктор Павлович Корольков**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия.

**Евгений Юрьевич Злоказов**, доктор физико-математических наук, доцент Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва, Россия.

**Михаил Сергеевич Ковалев**, кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший научный сотрудник ОКРФ Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

**Виктор Михайлович Петров**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

**Николай Васильевич Барышников**, доктор технических наук, профессор, директор НИИ РЛ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

**Владимир Петрович Лукин**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОА СО РАН, Томск, Россия.

**Андрей Николаевич Путилин**, кандидат физико-математических наук, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

**Роман Васильевич Скиданов**, доктор физико-математических наук, профессор, Институт систем обработки изображения РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самарский аэро-космический университет имени С. П. Королева, Самара, Россия.

**Чермен Борисович Кайтуков**, научный консультант АО «НТЦ «АТЛАС», Москва, Россия.

**Николай Валентинович Никоноров**, доктор физико-математических наук, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

**Валерий Викторович Коротаев**, д. т. н., профессор Университета ИТМО, главный редактор Оптического журнала, Санкт-Петербург, Россия.

# СОДЕРЖАНИЕ

## I. Современные тенденции развития голографии и прикладных оптических технологий

1. Резонансные, голографические, спекл-оптические исследования фазовых, диффузных и зеркальных объектов  
*Л. В. Танин* ..... 12
2. Новые оптические биомедицинские технологии на основе оптического просветления тканей  
*В. В. Тучин* ..... 13
3. Цифровая голография частиц и ее применения  
*В. В. Дёмин, И. Г. Половцев* ..... 15
4. Основные тренды развития стеклообразных материалов для применений в фотонике и голографии в XXI веке  
*Н. В. Никоноров* ..... 20
5. Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей Вклад ГИПО в развитие направления  
*А. В. Лукин* ..... 24
6. Сопоставительный анализ хроматизма склеенного нанокompозитного компонента и дифракционной линзы  
*Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров, С. В. Казин* ..... 29
7. Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы — обзор  
*Р. С. Стариков* ..... 36
8. Обзор современных оптических технологий для защиты банкнот  
*Л. И. Смирнов, А. А. Дудкина* ..... 38

## II. Управление параметрами лазерного излучения

9. Полностью оптический шейпинг трёхмерного солитона самоиндуцированной прозрачности в парах <sup>87Rb</sup>  
*С. Н. Багаев, И. Б. Мехов, И. А. Чехонин, М. А. Чехонин* ..... 40
10. Одновременная генерация N когерентных импульсов с различной площадью при самодифракции в парах <sup>87Rb</sup>  
*С. Н. Багаев, И. Б. Мехов, И. А. Чехонин, М. А. Чехонин* ..... 46
11. Формирование векторных вихрей с использованием уголковых отражателей с фазосдвигающим покрытием  
*В. Ю. Венедиктов, К. Н. Гаврильева, Ю. С. Гудин, В. Д. Ненадович, А. А. Рыжая, А. А. Севрюгин, А. Л. Соколов, Е. В. Шалымов* ..... 52
12. Проектирование преобразователя лазерного излучения типа Focal-piShaper методом геометрического картирования  
*Я. В. Терло, А. О. Вознесенская* ..... 56
13. Нарушается ли устойчивость структурированного вихревого пучка при ведении информации в его степени свободы?  
*А. Воляр, Е. Абрамочкин, М. Брецько, Я. Акимова, Ю. Егоров* ..... 62
14. Анализ проблем перемещений в пространстве компактного атомного интерферометра на основе дифракционной решетки  
*А. П. Вялых, А. В. Семенко, А. А. Луговой, Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев* ..... 68

15. Компактный атомный спектроскоп с отражателем в виде дифракционной решетки  
*А. В. Семенко, А. А. Луговой, А. П. Вялых, Г. С. Белотелов, М. В. Шишова, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев* ..... 71
16. Полихроматические пучки Бесселя–Гаусса  
*Ю. Егоров, Я. Акимова, М. Брецько, А. Воляр, С. Халилов* ..... 74

### III. Лазерные технологии в микрооптике, нанофотонике и структурированном свете

17. Прямая запись субволновых микроструктур на пленках аморфного кремния излучением полупроводникового лазера с  $\lambda = 405$  nm  
*А. А. Кутанов, В. П. Корольков, Н. Сыдык уулу, Р. И. Куц*..... 78
18. Прямая запись микроструктур в пленках карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками  
*Н. А. Ивлиев, А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина* ..... 84

### IV. Корреляционная и сингулярная оптика

19. Генерация суперпозиции скалярных вихревых пучков с применением многосекторных бинарных фазовых пластин  
*В. А. Шкуратова, Г. К. Костюк, А. А. Петров*..... 88

### V. Дифракционные и голограммные оптические элементы и их применения

20. Дифракционная эффективность пилообразных двухрельефных микроструктур в рамках электромагнитной теории дифракции  
*Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов* ..... 92
21. Анализ встраиваемых 2D дифракционных сенсорных элементов для контроля долговременной нестабильности систем лазерной записи ДОО  
*Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, Р. И. Куц*..... 99
22. Исследование дифракционных характеристик и фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур в кристалле танталата лития на основе методов Брэгговской дифракции  
*Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур*..... 105
23. Брэгга и вариациями глубины и формы профиля их поверхностной решетки  
*С. Н. Корешев, С. О. Старовойтов*..... 114
24. Гибридный метод расчета дифракционных оптических элементов, формирующих заданные распределения освещенности  
*Л. Л. Досколович, А. А. Мингазов, Е. В. Бызов, Д. А. Быков, Е. А. Безус, Р. В. Скиданов, Н. Л. Казанский* ..... 121
25. Сравнительный анализ алгоритмов расчета оптических систем с использованием композитных голограммных оптических элементов  
*Д. М. Ахметов, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, И. А. Гуськов, Н. К. Павлычева, А. Р. Гильфанов, А. И. Терентьев* ..... 126
26. Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах  
*Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, А. В. Архипов*..... 132
27. Создание плоских и вогнутых VLS-решеток для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение  
*А. О. Колесников, В. Н. Михайлов, Е. Н. Рагозин, В. П. Ратушный, А. Н. Шатохин*..... 134

28. Осевое мультиплексирование объемных брэгговских решеток с общим углом Брэгга в фото-термо-рефрактивном стекле <i>Е. С. Мусихина, С. А. Иванов</i> .....	138
29. Особенности формирования и свойства объемных и рельефных решеток в фотополимерных материалах <i>П. П. Соколов, Н. Д. Ворзобова</i> .....	142
30. Возможности лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр» <i>А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов</i> .....	145
31. Применение фотополимера Bayfol HX для сжатия импульсов в ИК диапазоне <i>В. Н. Борисов, И. В. Жлуктова, А. Д. Зверев, В. А. Камынин, М. С. Копьева, В. В. Лесничий, Р. А. Окунь, В. Б. Цветков</i> .....	151
32. Делительные машины маятникового типа — новые перспективные средства прецизионного формирования с наноразмерной точностью периодических штриховых структур на поверхностях с большой стрелкой прогиба <i>А. Н. Мельников</i> .....	154
33. Отражательные брэгговские решетки на ФТР стекле: влияние геометрии элемента на его брэгговские параметры <i>Ю. Л. Корзинин</i> .....	157
34. Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов <i>А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин, Ю. П. Бородин</i> .....	160

## VI. Оптические системы визуализации и отображения информации

35. Световодный оптический комбинер на фото-термо-рефрактивном стекле с брэгговскими решетками для наשלемых дисплеев <i>С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров</i> .....	165
36. Осевая голограмма в системах дополненной реальности <i>А. А. Калинина, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин</i> .....	168
37. Качество восстановленного 3D голографического контента после передачи динамической голографической информации методом сжатия, аналогичным SSB <i>С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев</i> .....	172
38. Искажения неосевых голографических линзовых элементов в схемах дисплеев дополненной реальности <i>Н. А. Путилин, С. С. Копенкин, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, Ю. П. Бородин</i> .....	177
39. Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений <i>В. Б. Глухенькая, Н. М. Толкач, П. И. Лазаренко, А. А. Шерченков, С. А. Козюхин</i> .....	181
40. Применение голографических бим-комбайнеров в различных типах дисплеев дополненной реальности <i>А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин</i> .....	186
41. Метод компенсации искажений виртуального изображения, формируемого дисплеем дополненной реальности на базе цилиндрического дифракционного волновода <i>А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин</i> .....	190
42. Моделирование голографического волновода для коллиматорного прицела <i>О. Л. Афанасьева, А. Б. Соломашенко, В. А. Кулин</i> .....	194



## VII. Технологии цифровой голографии и литографии

43. Голографическая запись на базе двумерных рельефов на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур  
*Д. А. Синева, Я. М. Андреева, А. Р. Суворов* ..... 197
44. Анализ допусков при формировании двумерных скрещенных решеток при лазерной литографии и программная коррекция режимов записи  
*В. П. Корольков, А. Г. Седухин, Р. И. Куц, Д. А. Белоусов, В. В. Черкашин, С. К. Голубцов, А. Р. Саметов, А. И. Мальшев, А. Е. Качкин* ..... 201
45. Применение лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для изготовления цифровых радужных голограмм  
*М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Н. А. Афанасьев, А. Р. Веласкес, Д. А. Синева, Г. В. Одинцова* ..... 207
46. Пример расчета дифракционной эффективности голограмм с асимметричным профилем полосы  
*А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин* ..... 211
47. Конструктивная геометрия системы записи image-matrix голограмм  
*В. В. Ткаченко, С. Л. Канделинский* ..... 216

## VIII. Интерферометрия и метрология

48. Разработка наземного стенда лазерного интерферометра для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС  
*С. С. Донченко, Р. А. Давлатов, Д. А. Соколов, Е. А. Лавров, И. О. Скакун* ..... 219
49. Интерферометр Тваймана-Грина с применением метода фазовых шагов  
*И. Ю. Фандиенко, Р. В. Минаев, Д. Б. Охрименко* ..... 224
50. Интерферометр для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ  
*Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев* ..... 226
51. Методы измерений показателя преломления оптических сред: преимущества и недостатки  
*А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Н. Чеплаков* ..... 233
52. Исследование когерентных и поляризационных характеристик рассеянного лазерного излучения при контроле качества поверхностей оптических деталей  
*Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик* ..... 239
53. Цифровая мера для метрологического обеспечения видеоизмерительных систем  
*В. Л. Минаев, Г. Г. Левин, Г. Н. Вишняков, А. А. Голополов* ..... 242
54. Определение влияния качества кварцевого стекла на изготовление пластины маятника акселерометра  
*И. Ю. Цельмина* ..... 246
55. Подходы к исследованию эванесцентного поля поверхностных плазмон-поляритонов на ТГц излучении Новосибирского лазера на свободных электронах  
*В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов* ..... 251
56. Макет эталонного дальномера в диапазоне до 600 м на основе фемтосекундного лазера  
*Д. А. Соколов* ..... 256
57. Цифровой контроль качества голограмм  
*Д. Б. Чекунин, И. К. Цыганов, Д. С. Лушников, Е. Ю. Злоказов* ..... 262

## IX. Оптическая обработка информации

58. Дифференцирование оптических сигналов с помощью каскадных структур «металл-диэлектрик-металл»  
*Е. А. Безус, А. И. Кашапов, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович* ..... 266

59. Разработка алгоритма и программного обеспечения цифровой голографической интерферометрии  
*Н. А. Акбарова, З. Т. Азаматов, Д. Т. Якубов* ..... 271
60. Об аппроксимации передаточной характеристики схемы голографии Фурье  
*А. О. Гаугель, А. В. Павлов* ..... 277

## X. Оптические защитные технологии

61. Формирование вращающихся и произвольно трансформирующихся световых полей для повышения защитных свойств голограмм  
*А. А. Свинцов, Ч. Б. Кайтуков, С. И. Зайцев, А. В. Яновский, Д. С. Копёнкин* ..... 285
62. Комбинированный защитный элемент на основе распределённого Брэгговского отражателя и рельефно-фазовой голограммы  
*А. В. Раздобарин, Л. И. Смирнов* ..... 289
63. Методы струйной печати для формирования оптических наноструктур  
*А. В. Виноградов, Т. Н. Погосян* ..... 295
64. Особенности ультрафиолетовой рекомбинации голограмм  
*А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин* ..... 299
65. Защита ценных изделий, документов или голограмм магнитными микроструктурными образованиями  
*А. С. Кузнецов, М. В. Волкова, А. П. Губарев* ..... 303

## XI. Фоточувствительные материалы

66. Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора  
*А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин* ..... 306
67. Разрешающая способность неорганического халькогенидного резиста при записи голограмм  
*М. Д. Михайлов, А. В. Белых, И. Ю. Юсупов* ..... 313
68. Влияние редкоземельных ионов на голографические свойства хлорсодержащего фото-термо-рефрактивного стекла  
*Х. Нассер, Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, А. И. Игнатъев* ..... 316
69. Запись монохромных и цветных голограмм в фотополимерном материале с использованием борат-сульфониевого комплекса с переносом заряда  
*Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников, В. В. Бардин* ..... 322
70. Гибридный амин-акрилат-тиол-силоксановый фотополимерный материал для записи микроструктур при повышенной влажности окружающей атмосферы  
*С. И. Алиев, Д. И. Деревянко, В. В. Шелковников, В. Н. Бережная, И. К. Шундрин* ..... 330
71. Антраценосодержащий полимерный материал с фенантренхиноном для формирования тонких и объемных голограмм  
*В. В. Могильный, Э. А. Храпцов, А. П. Шкадаревич* ..... 334
72. Структура трёхмерных голограмм, полученных в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц  
*Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников* ..... 337
73. Голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления  
*Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников* ..... 341
74. Модификация лазерным воздействием оптических свойств фоточувствительного детектора газоанализатора  
*А. А. Ольхова, А. А. Патрикеева, И. Г. Зайцев, М. М. Сергеев* ..... 346

## XII. Динамическая голография

75. Импульсная голографическая запись и диагностика объемных и тонкопленочных полупроводников методом динамических решеток  
*А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич* ..... 349
76. Усиление нелинейностей при коллинеарном взаимодействии света с бегущей решеткой показателя преломления  
*В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко* ..... 353
77. Моды утечки и нелинейности в бегущих электро-оптических решетках  
*В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко* ..... 357
78. Исследование динамики пылеобразования в быстропротекающих процессах на основе малоуглового рассеяния света  
*Ш. М. Исмаилов, В. Г. Каменев* ..... 360

## XIII. Микрооптика и метаматериалы

79. Металинзы для острой фокусировки света и формирования обратных потоков энергии  
*С. С. Стафеев, А. Г. Налимов, Л. О. Фаолейн, В. В. Котляр* ..... 365
80. Резонансы в дифракционных решетках с изменяющимся периодом  
*Д. А. Быков, А. А. Морозов, Е. А. Безус, В. В. Подлипов, Л. Л. Досколович* ..... 368
81. Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на базе интерференционной микроструктуры  
*А. А. Рыбак, С. А. Кузнецов, Н. А. Николаев* ..... 373
82. Генерация и исследование терагерцовых вихревых поверхностных плазмонов на цилиндрической поверхности  
*Н. Д. Осинцева, Б. А. Князев, Ю. Ю. Чопорова, В. В. Герасимов, В. С. Павельев* ..... 379
83. Влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции  
*П. А. Хорин, С. Н. Хонина* ..... 383
84. Исследование фазовых спектров спуп локализованных плазмонных резонансов, возбуждаемых на спиральных двумерных метаматериалах с тонкими диэлектрическими покрытиями в терагерцовом диапазоне частот  
*О. Э. Камешков, В. В. Герасимов* ..... 388

## XIV. Фазовая визуализация и цифровая микроскопия

85. Оптические методы и исследование субклеточной структуры функционирующей клетки  
*Г. В. Максимов* ..... 391
86. Численная обработка изображений, получаемых с помощью голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры  
*А. В. Черных, А. С. Езерский, К. А. Герасимов, А. А. Мисюра, Н. В. Петров* ..... 393
87. Многоволновая цифровая голография на основе мультичастотной акустооптической фильтрации излучения  
*О. В. Польщикова, А. В. Горевой, А. С. Мачихин* ..... 397
88. Конфокальная голографическая сканирующая микроскопия  
*Ю. Н. Захаров* ..... 401
89. Анализ реакции клеток *in vitro* на фотодинамическое воздействие с использованием методов цифровой голографической микроскопии и томографии  
*И. В. Семенова, А. В. Белашов, А. А. Жихорева, О. С. Васютинский* ..... 404

90. Применение методов количественного фазового имиджинга с использованием когерентного и низкокогерентного излучения для исследования реакции живых клеток на фотодинамическое воздействие  
*А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Т. Н. Беляева, А. В. Салова, Е. С. Корнилова, И. В. Семенова, О. С. Васютинский* ..... 410
91. Мультиспектральная фантомная визуализация с излучением суперконтинуума: верификация концепции  
*Е. Н. Опарин, В. С. Шумигой, А. О. Исмагилов, А. В. Черных, Н. В. Петров, А. Н. Цыпкин* ..... 414

## XV. Новые прикладные оптические технологии

92. Оценка погрешности величины хорды при видеоэндоскопии рабочих лопаток паровых турбин большой единичной мощности  
*Л. С. Родикова, В. В. Кортаев, А. Н. Тимофеев* ..... 417
93. Перспективы применения спекл-фотоники процессов, протекающих в живой и неживой материи  
*А. П. Владимиров* ..... 421
94. Усовершенствование устройства диагностики неисправностей высоковольтного оборудования  
*А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков* ..... 430
95. Станок новой конструкции для двухстороннего полирования оптических плоско-параллельных пластин прямоугольной формы  
*Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, Н. Н. Дубовик, А. С. Кузнецов* ..... 435

## XVI. Системы мульти- и гиперспектральной визуализации

96. Матрицы гармонических линз как дисперсионный элемент гиперспектрометра на основе цветной светочувствительной матрицы  
*Р. В. Скиданов, В. А. Бланк, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипнов, Н. А. Ивлиев* ..... 441
97. Расчет и изготовление согласованных микрорельефов гармонических и спектральных линз для дисперсионных элементов  
*Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская* ..... 446

# Резонансные, голографические, спекл-оптические исследования фазовых, диффузных и зеркальных объектов

*Л. В. Танин*

ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Республика Беларусь

Представлены результаты исследований в области разработки методов резонансной интерферометрии и флуоресценции для изучения высокотемпературной и низкотемпературной плазмы; динамической резонансной голографии в парах атомного натрия; разработки многодлинового метода голографического оконтуривания рельефа поверхностей; разработки методов голографической интерференционной микроскопии для исследования параметров полупроводниковых лазеров в широком диапазоне токов, температур, механических нагрузок; разработки спекл-оптических методов для определения продольного смещения, колебаний, деформаций, скорости движения диффузных объектов; создания и разработки голографического метода исследования когерентных свойств лазерных источников с неустойчивой медовой структурой. Приводятся также результаты исследований в области художественной и защитной голографии, в том числе по созданию и разработке технологий серийного производства отражательных и защитных голограмм.

*Ключевые слова:* Плазма, Резонансная голограмма, Пары атомного натрия, Голографическая микроскопия, Полупроводниковые лазеры, Пространственная когерентность, Защитная голография, Художественная голография.

*Цитирование:* Танин, Л. В. Резонансные, голографические, спекл-оптические исследования фазовых, диффузных и зеркальных объектов / Л. В. Танин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 12.

## Resonance, holographic, speckle-optical research of phase, diffuse and mirror objects

*L. V. Tanin*

JSC «HOLOGRAPHY INDUSTRY», Minsk, Belarus

The results of the research in the field of development of methods of resonance interferometry and fluorescence for studying high-temperature and low-temperature plasma are presented; in the field of dynamic resonance holography in atomic sodium vapor; development of a multi-length method of holographic contouring of surface relief and holographic interferential microscopy for studying the parameters of semiconductor lasers in a wide range of currents, temperatures mechanical loads; development of speckle-optical methods for determining the longitudinal displacement, vibrations, deformations, velocities of diffuse objects initiation and development of holographic method for studying the coherent properties of laser sources with an unstable mode structure. The results of the research in the field of art and protective holography are presented, including initiation and development of new technologies for serial production of reflective and protective holograms.

*Keywords:* Plasma, Resonance hologram, Atomic sodium vapor, Holographic microscopy, Semiconductor lasers, Spatial coherence, Security holography, Art holography.

# Новые оптические биомедицинские технологии на основе оптического просветления тканей

*В. В. Тучин*

Научный медицинский центр, Саратовский государственный университет, Саратов, Россия

Лаборатория лазерной молекулярной визуализации и машинного обучения, Томский

государственный университет, Томск, Россия

Лаборатория лазерной диагностики технических и живых систем, Институт точной механики и управления, ФНЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия

Институт биохимии имени А. Н. Баха, ФНЦ «Биотехнология РАН», Москва, Россия

В лекции представлены принципы и достижения в области оптического просветления тканей, а также обсуждение новых областей биомедицинского применения оптических технологий, в частности для мультимодальной визуализации, мониторинга доставки лекарств и оптической связи с имплантатами в организме человека [1–3]. Оптическое просветление тканей основано на управлении оптическими свойствами тканей за счет уменьшения светорассеяния при введении иммерсионных оптических агентов. Основными механизмами оптического просветления являются обезвоживание тканей и выравнивание показателей преломления компонентов ткани с высоким влиянием конструктивной интерференции рассеянных волн при временной и обратимой модификации морфологии ткани.

*Ключевые слова:* Свет, Ткань, Оптическое просветление, Визуализация, Интерференция, Когерентно-оптические методы.

*Цитирование:* Тучин, В. В. Новые оптические биомедицинские технологии на основе оптического просветления тканей / В. В. Тучин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 13–14.

## Список источников

- [1] L. Oliveira L. M. C., Tuchin V. V. The optical clearing method: A new tool for Clinical Practice and Biomedical Engineering. – Springer Nature, 2019.
- [2] Tuchin V. V., Zhu D., Genina E. A. (ed.). Handbook of tissue optical clearing: new prospects in optical imaging. – CRC Press, 2022.
- [3] Tuchin V. V. et al. Optical clearing of tissues: issues of antimicrobial phototherapy and drug delivery // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2022. – Т. 180. – С. 114037.

# **New optical biomedical technologies based on optical clearing of tissues**

*Valery V. Tuchin*

Science Medical Center, Saratov State University, Saratov, Russia

Laboratory of Laser Molecular Imaging and Machine Learning, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Laboratory of Laser Diagnostics of Technical and Living Systems, Institute of Precision Mechanics and Control, FRC «Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Saratov, Russia

A.N. Bach Institute of Biochemistry, FRC «Biotechnology of the Russian Academy of Sciences», Moscow, Russia

The lecture presents the principles and advances in the field of optical tissue clearing, as well as a discussion of new areas of biomedical applications of optical technologies, in particular for multimodal imaging, drug delivery monitoring and optical communication with implants in the human body. Optical clearing of tissues is based on the control of the optical properties of tissues by reducing light scattering with the introduction of optical immersion agents. The main mechanisms of optical clearing are dehydration of tissues and matching of the refractive indices of tissue components with a high impact of constructive interference of scattered waves during temporary and reversible modification of tissue morphology.

*Keywords:* Light, tissue, Optical clearing, Imaging, Interference, Coherence-domain techniques.

# Цифровая голография частиц и ее применения

*В. В. Дёмин, И. Г. Половцев*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

В работе представлена ДНС-технология (ДНС — Digital Holographic Camera), включающая запись цифровой голографии объема среды, содержащей частицы, восстановление изображений частиц, определение их размеров, форм, их распознавание, а также определение их местоположения и динамики движения. Представлены аппаратные реализации технологии и применения, показывающие уникальные возможности in-situ исследований планктона и морских частиц, 3D картирования неоднородностей и исследования пробоя в оптических средах.

**Ключевые слова:** Цифровая голография, Подводная цифровая голография частиц, Цифровая голография оптических неоднородностей.

*Цитирование:* Дёмин, В. В. Цифровая голография частиц и ее применения / В. В. Дёмин, И. Г. Половцев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 15–19.

## Введение

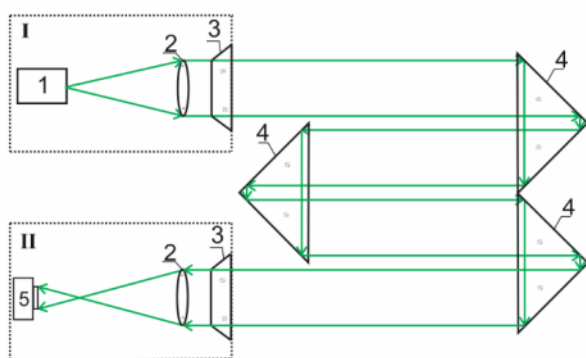
Голография применяется для исследования частиц различного происхождения в различных средах (аэрозоли, планктон, эритроциты, капли в распыле топливных форсунок и т.п.) [1-4]. Использование ПЗС (КМОП) камеры позволяет записывать голограмму в цифровом виде (в виде файла) и восстанавливать изображения частиц численно, что обеспечивает дополнительные возможности – передачу голограммы по линиям связи при исследовании труднодоступных или удаленных объектов, предварительную численную обработку голограммы и улучшение качества восстановленного изображения, создание видео на базе голографических данных. При этом цифровая голограмма представляет собой двумерный массив дискретных квантованных данных распределения интенсивности картины интерференции опорной и предметной волн, что требует определенных алгоритмов обработки. В работе рассматриваются эти особенности, описывается ДНС технология (Digital Holographic Camera) [4], включающая запись цифровой голографии объема среды, содержащей частицы, и получение из голограммы полной информации о частицах. Демонстрируются экспериментальные результаты применения ДНС технологии и ее аппаратно-программных реализаций для исследования планктона в среде обитания, 3D картирования неоднородностей в оптических средах, исследования процесса пробоя в монокристалле [4-6].

## 1. Аппаратные реализации ДНС технологии

Нами разработаны, изготовлены и апробированы в натуральных и производственных условиях несколько аппаратно-программных реализаций ДНС технологии [4-6]. Все они построены по осевой схеме, когда исследуемый объем среды с частицами просвечивается лазерным пучком, излучение, рассеянное на частицах, является предметной волной, а излучение, прошедшее



без рассеяния — опорной волной. На рис. 1 представлена модификация осевой схемы, когда пучок, просвечивающий среду, организован в «сложенном варианте» при помощи призм. Это позволило существенно уменьшить габариты камеры, сохранив при этом протяженность исследуемого объема (глубину регистрируемой сцены) 700 мм, что при диаметре освещающего пучка 40 мм обеспечивает регистрацию за одну экспозицию голограммы объема около 0,5 л. Размещение освещающего и регистрирующего модулей в прочных герметичных корпусах позволяет использование данной камеры до глубины 600 м. Разработан также вариант ДНС (рис. 2а) с тремя лазерами: зеленый (аттракторный свет для фотостимуляции активности планктона), красный (для регистрации голограммы) и фиолетовый (для исследования люминесцирующих водорослей). Эта модификация ДНС предназначена для изучения поведенческих реакций планктона на загрязнение среды обитания.

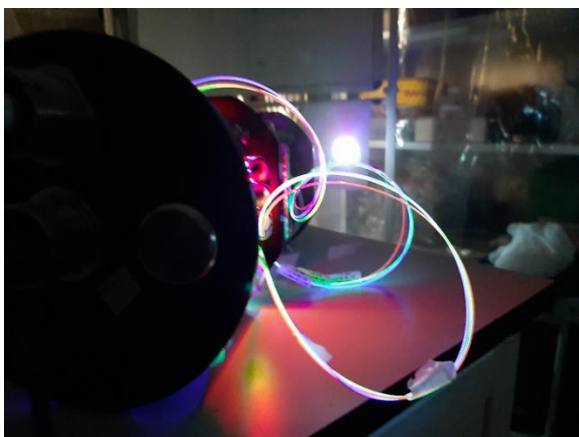


а) I — освещающий модуль; II — регистрирующий модуль;  
1 — лазер; 2 — объективы; 3 — иллюминаторы;  
4 — призмы; 5 — CMOS камера

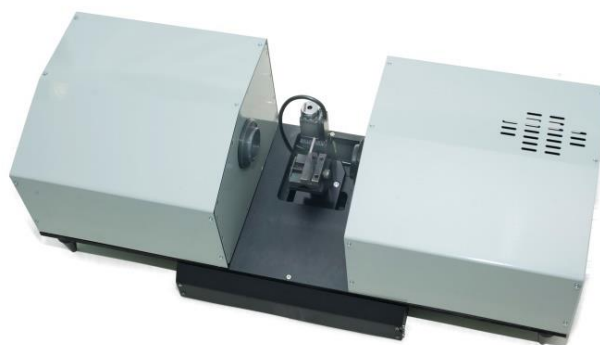
б) фотография ДНС в сборе, модули в герметичных прочных корпусах

**Рис. 1.** Оптическая схема и фотография погружаемой ДНС

На рис. 2б приведена модификация ДНС, предназначенная для 3D картирования неоднородностей и изучения пробоя в монокристалле  $ZnGeP_2$ . для последующего выбора бездефектных областей при раскрое на рабочие элементы, а также для уточнения процесса выращивания монокристалла. Отметим, что здесь использована классическая (не «сложенная») осевая схема.



а) трехдлинноволновая лазерная волоконная система для ДНС- выявления поведенческих реакций



б) настольная ДНС для диагностики оптических сред и монокристаллов

**Рис. 2.** Пример аппаратных реализаций ДНС

## **2. ДНС исследования планктона и морских частиц**

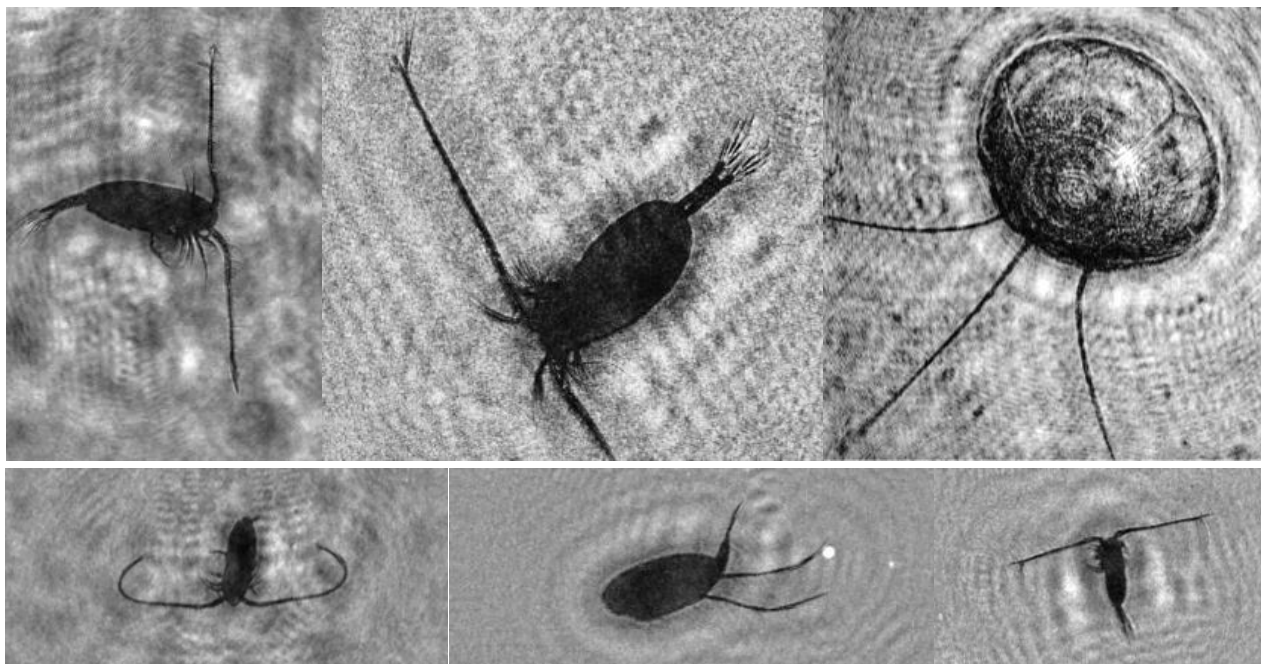
В настоящее время непрерывный мониторинг свойств океана при помощи различных сенсоров (морская сенсорика) является как никогда актуальным и ответственным процессом. Планктон мирового океана- начало пищевой цепочки, поэтому его состояние является важным фактором сохранения биоразнообразия, а использование его в естественной среде обитания в качестве биоиндикатора позволяет на ранних стадиях определить устойчивость этой среды к различным факторам, связанным, например, с антропогенным воздействием. Представленные в статье ДНС сенсоры, создаваемые в ТГУ, предназначены для гидробиологических измерений *in situ* с получением информации в реальном времени с использованием современных каналов связи, обработки больших данных, нейронных сетей и машинного обучения.

Представленные в работе цифровые голографические сенсоры планктона и морских частиц, позволяющие выполнять детектирование, измерение геометрических параметров, распознавание и анализ двигательной активности планктонных частиц, являются новым (с точки зрения методики измерений) измерительным средством морской сенсорики, и ориентированы на решение следующих задач экологического мониторинга:

- *in situ* построение распределения планктонной концентрации по глубине, а также классификация планктона по таксономическим признакам с целью экологического мониторинга, идентификации биоресурсов, океанологических, гидробиологических исследований с получением результата в реальном времени в режиме непрерывного потока данных,

- *in situ* анализ поведения планктонных частиц с целью раннего биотестирования в акватории опасных объектов (атомных станций, нефтяных платформ, газопроводов и т.п.) в мониторинговом режиме;

– *in situ* анализ взвешенных частиц для построения гидрологических моделей переноса частиц твердой взвеси,



**Рис. 3.** Голографические изображения планктонных частиц, полученные в натуральных условиях

Погружаемые ДНС использованы для измерений в нескольких экспедициях в Черном море, в Кольском заливе, в Карском море, на озере Байкал. В работе приведены экспериментальные результаты натуральных измерений. Примеры голографических изображений планктонных особей, полученных *in situ* при помощи погружаемой ДНС, приведены на рис. 3.

### **3. Исследования оптических сред**

Объемные дефекты (включения по оптической терминологии) в нелинейных оптических материалах, например, монокристаллах  $ZnGeP_2$ , существенно сказываются на оптических свойствах: показатель преломления, коэффициент поглощения, оптическая прочность. С этой точки зрения обнаружение в материале объемных включений и указание точного их расположения в значительном объеме материала (около  $500 \text{ мм}^3$ ) является аларм-сигналом нарушения оптических свойств. В данной работе представлены результаты контроля качества монокристаллического материала  $ZnGeP_2$  в производственном процессе с применением цифровой голографии (рис. 2б). Приведены также голографические исследования процесса оптического пробоя в монокристалле.

### **Заключение**

Выполненные исследования показали уникальные возможности цифровой голографии частиц, при *in situ* исследованиях планктона, а использование разработанных погружаемых камер в натуральных условиях позволили уточнить особенности их применения и диапазоны

измеряемых параметров планктона и морских частиц. В исследованиях оптических сред показано, что цифровая голография частиц полезна не только при выборе монокристаллических областей, обеспечивающих максимально возможную эффективность нелинейно-параметрического преобразования частоты лазерного излучения, но и для прогнозирования оптической прочности нелинейных элементов.

### Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

### Список источников

- [1] **Fugal J.P., Shaw R.A.** Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // *Atmos. Meas. Tech.*— 2009.— Vol. 2.— № 1.— P. 259–271.
- [2] **Watson J.** Submersible digital holographic cameras and their application to marine science // *Opt. Eng.*— 2011.— Vol. 50.— № 9.— P. 091313–1–091313–5.
- [3] **Kumar V., Khan G.S., Shakher C.** Phase contrast imaging of red blood cells using digital holographic interferometric microscope // *Proc. SPIE.*— 2017.— Vol. 10453.— P. 104532T–1 – 104532T–7.
- [4] **Dyomin V. et al.** Holography of particles for diagnostics tasks [Invited] // *Appl. Opt.*— 2019.— Vol. 58.— № 34.— P. G300–G310.
- [5] **Dyomin V. et al.** Underwater Holographic Sensor for Plankton Studies In Situ including Accompanying Measurements // *Sensors.*— 2021.— Vol. 21.— № 4863.— P. 1–19.
- [6] **Dyomin V.V. et al.** Visualization of volumetric defects and dynamic processes in crystals by digital IR–holography // *Appl. Opt.* — 2021. — Vol. 60.— № 4.— P. A296–A305.

## Particles digital holography and its applications

*V. V. Dyomin, I. G. Polovtsev*

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The paper presents DHC-technology (DHC – Digital Holographic Camera), which includes recording digital hologram of the medium volume containing particles, reconstruction images of particles, determining their sizes, shapes, their recognition, as well as determining their location and motion dynamics. Hardware implementations of the technology and its applications are presented, showing the unique capabilities of in situ studies of plankton and marine particles, 3D mapping of inhomogeneities and study of breakdown in optical media.

**Keywords:** Digital holography, Underwater digital holography of particles, Digital holography of optical heterogeneities.

# Основные тренды развития стеклообразных материалов для применений в фотонике и голографии в XXI веке

*Н. В. Никоноров*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

2022 год объявлен Международным Годом Стекла. Цель — привлечение внимания международной общественности к развитию фундаментальных и прикладных наук в области стекла и вовлечению в стекольную среду молодых специалистов. Настоящий доклад посвящен оптическим стеклам, которые решают задачи в фотонике и голографии. Показана роль оптического стекла в жизни человека, рассмотрена хронология развития и прорывные стекольные технологии. Определены ключевые тренды развития фотоники и стеклообразных материалов в XXI веке. Рассмотрено современное состояние оптической науки и индустрии в России и Университете ИТМО. Приведен пример разработки фото-термо-рефрактивного стекла и создания широкой линейки голографических оптических элементов фотоники нового поколения. Отдельное внимание уделено подготовке кадров по стекольному направлению.

*Ключевые слова:* Оптическое стекло, Роль оптического стекла, Тренды развития оптического стекла, Фото-термо-рефрактивное стекло, Голографические оптические элементы.

*Цитирование:* **Никоноров, Н. В.** Основные тренды развития стеклообразных материалов для применений в фотонике и голографии в XXI веке / Н. В. Никоноров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 20–23.

2022 год объявлен Международным Годом Стекла. Цель — привлечение внимания международной общественности к развитию фундаментальных и прикладных наук в области стекла и вовлечению в стекольную среду молодых специалистов. В докладе дан обзор по одному из направлений в стекольной отрасли - оптическим стеклам, которые решают задачи в оптике и фотонике. По сравнению с общим объемом выпуска стекольной продукции, включающей тарное, листовое, сортовое, светотехническое, медицинское, химико-лабораторное, стекловолокно, направление оптических стекол занимает небольшую часть ~ 1–2 %. Но это крайне важный и востребованный сектор на рынке фотоники. Так стоимость килограмма оптического стекла может превышать стоимость килограмма тарного, листового или сортового стекла в сотни раз. Оптические стекла, по сравнению с техническими стеклами, охватывают чрезвычайно широкое разнообразие составов и легирующих добавок. Так, например, для оптических стекол используются силикатные, фосфатные, боратные, германатные, алюминатные, теллуридные и т.д. стеклообразующие составы. Оптические стекла обладают чрезвычайно разнообразным функционалом, который позволяет проводить разнообразные операции со световыми потоками: передавать световые потоки, выделять заданные спектральные диапазоны, генерировать, усиливать и модулировать свет, преобразовывать длину волны света, вращать плоскость поляризации, записывать и хранить информацию и т.д. Для этих задач стекла легируются широким спектром добавок: ионами

редких земель, переходных и благородных металлов, молекулярными кластерами, квантовыми точками, наночастицами и нанокристаллами.

Сегодня можно выделить несколько ключевых трендов в развитии оптических стекол в XXI веке:

1) разработка стекол для миниатюризации оптических и фотонных элементов, приборов и систем с целью уменьшения их массогабаритных характеристик, энергопотребления и управляющих воздействий;

2) расширение функционального диапазона работы стекол. На смену традиционным оптическим материалам должны прийти наноматериалы, обладающие уникальными квантово-размерными характеристиками, и метаматериалы, обладающие физическими свойствами, которые не встречаются в природе (отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью). Должны быть созданы не только лабораторные образцы этих материалов, а разработаны их промышленные технологии;

3) разработка оптических стекол, позволяющих проводить гибридную и монолитную интеграцию оптических и фотонных элементов, приборов и систем на единой подложке;

4) разработка оптических стекол со сверхбыстрым (фс) переключением и с низким уровнем энергии управляющих сигналов (фДж) для создания полностью оптических устройств управления сигналом;

5) разработка сверхчистых стекол с рекордно низкими потерями и специальным ходом дисперсии для волоконных линий связи и фотолитографии;

6) разработка стекол для микро-структурированных и фотонно-кристаллических оптических волокон, в том числе активированных для волоконных лазеров и сенсоров;

7) разработка стекол и стеклокерамик, в том числе активированных, для получения крупногабаритных оптических элементов высокого оптического качества (лазерный термоядерный синтез, фотолитография, астрономическая оптика);

8) разработка гибридных материалов типа «стекло-полимер» для сверхлегких оптических элементов (авионика, космос);

9) разработка сверхпрочных стекол и стеклокерамик (авионика, глубоководные и космические аппараты);

10) разработка сверхтонких крупногабаритных стеклянных панелей (дисплеи, солнечные батареи, гибкая и рулонная оптика);

11) разработка стекол с низкими температурами формования и молирования и особым ходом дисперсии (микрооптика);

12) разработка стекол и стеклокерамик, работающих в среднем и дальнем ИК спектральном диапазоне, а также ТГц диапазоне;

13) разработка фоточувствительных стекол и стеклокерамик для голографических оптических элементов нового поколения.

В докладе рассмотрено современное состояние в оптической стекольной отрасли в мире, России и Университете ИТМО. Так, например, в Университете ИТМО разработана широкая линейка стекол нового поколения:

- лазерные высококонцентрированные стекла и стеклокерамики, активированные редкоземельными ионами, для мини- и микролазеров ближнего ИК диапазона;
- стекла с нанокристаллами рубина для лазеров красного диапазона спектра, используемых в медицине и косметологии;
- магнитооптические стекла, реализующих эффект Фарадея, для оптических изоляторов и волоконных датчиков магнитных и электрических полей;
- нелинейно-оптические стекла с нанокристаллами галогенидов и халькогенидов металлов для фильтров-лимитеров, защищающих органы зрения и фотоприемники от действия импульсного лазерного излучения;
- плазмонные стекла, легированные наночастицами серебра и меди, для химических и биологических сенсоров;
- люминесцентные стекла, легированные ионами редких земель и переходных металлов, в том числе стекла с нанокристаллами перовскитов, для люминофоров и маркеров;
- ионообменные и сверхпрочные стекла для планарных волноводов и градиентных оптических элементов, а также сверхтонких дисплеев и защитных стекол солнечных батарей;
- фото-структурируемые стекла для «лабораторий на чипе» и микросистем полного анализа;
- фотохромные и мультихромные стекла для архивной памяти, оптической записи монохромного и цветного изображения;
- фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла для записи объемных фазовых голограмм.

Отличительной особенностью разработок Университета ИТМО является создание не только стекол, но и оптических элементов и устройств на их основе. Так, например, на основе разработанного ФТР стекла создана линейка голографических оптических элементов и устройств фотоники нового поколения:

- сверхузкополосные фильтры для повышения спектральной яркости излучения и температурной стабилизации длины волны лазеров, в том числе полупроводниковых;
- объемные брэгговские решетки для одночастотных лазерных источников, применяемых в квантовых коммуникациях;
- голографические призмы для калибровки углоизмерительных и углозадающих приборов навигации;
- сумматоры мощных лазерных пучков;
- метки для голографических коллимационных лазерных прицелов;
- дисплеи и очки дополненной реальности и т.д.

Отличительной особенностью разработок Университета ИТМО является создание не только стекол, но и оптических элементов и устройств на их основе. Так, например, на основе разработанного ФТР стекла создана линейка голографических оптических элементов и устройств фотоники нового поколения:

- сверхузкополосные фильтры для повышения спектральной яркости излучения и температурной стабилизации длины волны лазеров, в том числе полупроводниковых;

- объемные брэгговские решетки для одночастотных лазерных источников, применяемых в квантовых коммуникациях;
- голографические призмы для калибровки углоизмерительных и углозадающих приборов навигации;
- сумматоры мощных лазерных пучков;
- метки для голографических коллимационных лазерных прицелов;
- дисплеи и очки дополненной реальности и т.д.

Разработанные в Университете ИТМО новые стекла, элементы и устройства на их основе позволяют успешно конкурировать на мировом рынке фотоники.

Отдельное внимание в докладе уделено подготовке кадров для оптической стекольной отрасли. Показано, что в оптической индустрии востребована не только университетская стекольная наука и ее продукция, но и выпускники высокой квалификации с широким профилем компетенций.

## **The main trends in the development of glassy materials for applications in photonics and holography in the XXI century**

*N. V. Nikonorov*

ITMO University, St. Petersburg, Russia

2022 has been declared the International Year of Glass. The goal is to attract the attention of the international community to the development of fundamental and applied sciences in the field of glass and to involve young specialists in the glass environment. This report is devoted to optical glasses that solve problems in photonics and holography. The role of optical glass in human life is shown, the chronology of development and breakthrough glass technologies are considered. The key trends in the development of photonics and glassy materials in the XXI century are determined. The current state of optical science and industry in Russia and ITMO University is considered. An example of the development of photo-thermo-refractive glass and the creation of a wide range of holographic optical elements of photonics of a new generation is given. Special attention is paid to students training in the glass industry.

*Keywords:* Optical glass, Role of optical glass, Optical glass development trends, Photo-thermo-refractive glass, Holographic optical elements.



# Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей Вклад ГИПО в развитие направления

А. В. Лукин

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассматриваются исторический аспект и тенденции развития технологий формообразования и методов лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей в контексте деятельности ГИПО.

*Ключевые слова:* Асферическая оптика, Технологии формообразования, Методы лазерно-голографического контроля, Комбинированный оптический элемент, Прецизионная репликация, Мастер-матрица, Исторический аспект, Тенденции развития.

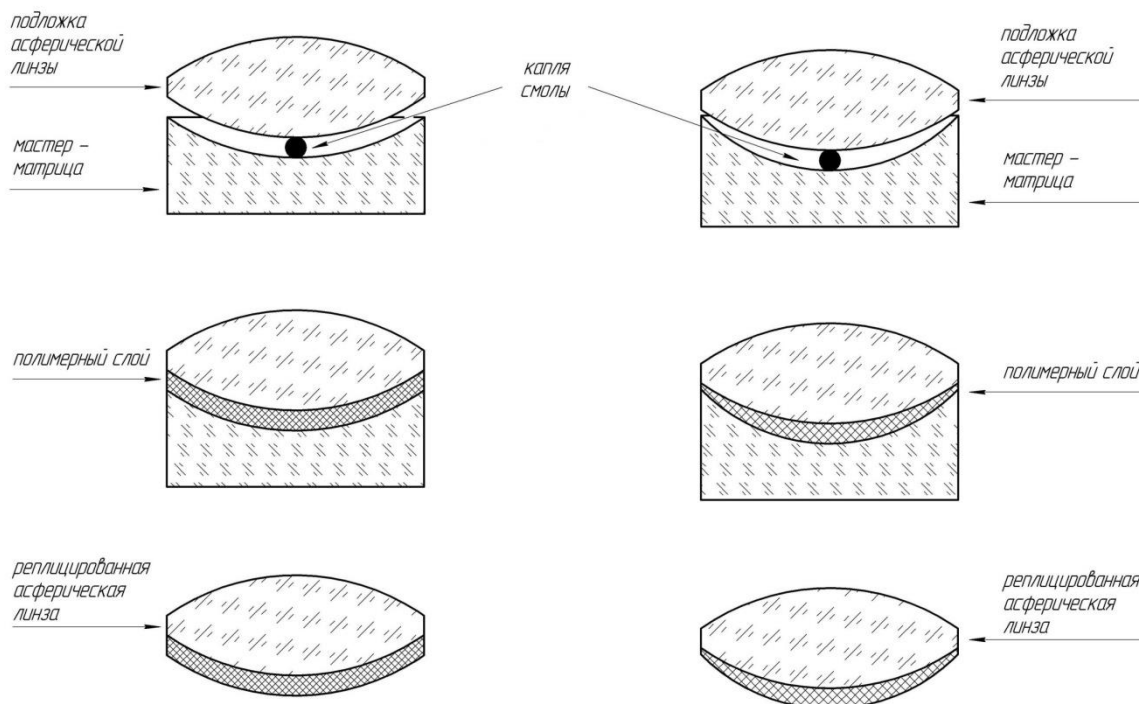
*Цитирование:* Лукин, А. В. Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей Вклад ГИПО в **развитие направления** / А. В. Лукин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 24–28.

С начала 1960-х годов, еще будучи в ранге филиала Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) был определен головным предприятием в отрасли по ряду научных направлений, в том числе по прикладной голографии, теневым и спектральным приборам и по разработке технологий и оборудования для изготовления асферических оптических деталей. Дальнейшее ускоренное развитие этих трех важнейших для отрасли научно-технологических направлений осуществлялось в рамках созданного по инициативе руководства ГИПО, поддержанной Министерством оборонной промышленности, научно-технологического комплекса (НТК) дифракционной, асферической и интегральной оптики, возглавить который было предложено автору. Все подразделения НТК были сосредоточены в отдельном специализированном 4-х этажном здании с общей технологической площадью 7000 м<sup>2</sup>. В относительно короткие сроки были разработаны новые прецизионные технологии формообразования оптических асферических поверхностей (АП) на основе использования ряда автоматизированных шлифовально-полировальных станков нового поколения серии «Планета» и упруго-деформируемого инструмента [1]. Разработка этих станков была выполнена Минским механическим заводом по техническим заданиям и под общим научным руководством специалистов ГИПО. Были разработаны четыре модели станков, обеспечивающие формообразование АП диаметром от 20 до 500 мм. После организации серийного выпуска станков в Минске и Сморгони ими были оснащены оптические производства всех оптико-механических предприятий отрасли [2]. За период с 1971 по 1988 год всего было выпущено их около 100 штук.

В дальнейшем на смену упруго-деформируемому инструменту пришел менее затратный и более производительный полноразмерный жесткий прецизионный инструмент [2, 3].

За период с 1962 по 1996 год в ГИПО было изготовлено около 15000 штук прецизионных светосильных АП, в том числе уникальные АП для оснащения нескольких искусственных спутников Земли серии «Космос», орбитальной станции «Салют-4», автоматических станций «Марс-1» и «Марс-2», спускаемых аппаратов межпланетных станций «Вега-1», «Вега-2», «Венера-Галлея».

Другим важным этапом развития данного научно-технологического направления явилась разработка производительных технологий формообразования практически всех видов оптических асферических поверхностей путем прецизионной репликации АП с высокоточных мастер-матриц в относительно тонком полимерном слое на стеклянную подложку (см. рис. 1) с последующим интерферометрическим контролем на основе использования осевых синтезированных голограмм в качестве оптических образцов и компенсаторов. Тем самым был открыт путь для кардинального решения одной из самых актуальных проблем современного объективостроения — двуединой проблемы серийного высокоточного формообразования и аттестационного контроля асферической оптики, в том числе инфракрасных (ИК) объективов для тепловизионной аппаратуры [3, 4].



а) форма рабочей поверхности подложки так же асферическая (близкая по форме к рабочей поверхности мастер-матрицы), поэтому полимерный слой во всех зонах имеет приблизительно равную толщину и влиянием его усадок можно пренебречь

б) копирование на ближайшую трехточечную сферу; полимерный слой в различных зонах светового диаметра имеет разную толщину и его усадки вызывают соответствующие аберрации

**Рис.1.** Упрощенная принципиальная схема процесса репликации выпуклой асферической поверхности двояковыпуклой линзы

Применение *иерархической системы мастер-матриц*, предназначенных для серийного и массового производства комбинированных оптических элементов (КОЭ), включающей эталонные, контрольные и рабочие матрицы (по аналогии со сферическими пробными стеклами), позволяет обеспечить высокую стабильность и рентабельность такого производства. Следует отметить, что полномасштабная реализация этой иерархической системы мастер-матриц целесообразна лишь при массовом и периодически повторяющемся производстве КОЭ.

В случае же даже очень крупных, но разовых партий оптимальным представляется изготовление только одной пары эталонных мастер-матриц (выпуклая + вогнутая) и уже непосредственно с одной из них реплицирование необходимого количества *рабочих* мастер-матриц. При этом мастер-матрица противоположного знака будет выполнять важную метрологическую функцию *эталоны*, обеспечивая возможность периодической аттестации основной мастер-матрицы, чтобы вовремя обнаружить недопустимые изменения формы ее рабочей поверхности. Идея введения в практику серийного реплицирования оптических поверхностей *иерархической системы классификации* мастер-матриц была предложена нами ранее [3].

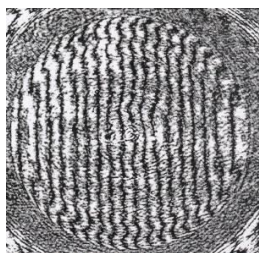
Следует отметить три важнейшие отличительные особенности КОЭ, выявленные нами в ходе исследований:

- по сохраняемости (долговечности) и устойчивости к внешним механическим и климатическим воздействиям они близки соответствующим стеклянным аналогам;
- по себестоимости при серийном и массовом производстве они не уступают чисто полимерным элементам;
- оптическое качество рабочих поверхностей КОЭ (общая  $N$  и местные  $\Delta N$  отклонения, параметр шероховатости, класс чистоты и др.) при соблюдении технологических требований идентично качеству соответствующей мастер-матрицы.

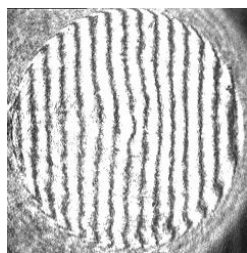
Именно эти особенности КОЭ обеспечивают возможность достижения предельно низкой себестоимости серийного выпуска на их основе объективов различного назначения при высоком оптическом качестве и долговечности. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований КОЭ с двумя идентичными реплицированными АП, выполняющего функцию однокомпонентного коллиматорного объектива.

В настоящее время наибольшую практическую значимость может получить серийное изготовление сферических КОЭ-зеркал и линз в силу наличия у большинства отечественных и зарубежных предприятий с традиционным оптическим производством уже имеющихся эталонных мастер-матриц *высочайшего оптического качества* в виде накопленного за долгие годы их производственной деятельности значительного архива основных (эталонных) пробных стекол, полная номенклатура которых согласно действующим стандартам имеет около трех тысяч дискретных номиналов. Заметим, что на некоторых оптических

производствах до сих пор существуют участки сферических пробных стекол, где функционируют, по возможности, оптики-рабочие самой высокой



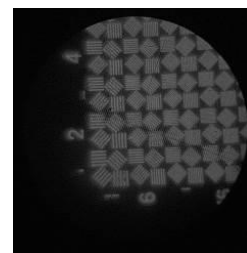
а) интерферограмма вогнутой асферической рабочей поверхности мастер-матрицы (интерферометр типа Тваймана-Грина,  $\lambda = 632,8$  нм, среднеквадратичное отклонение волнового фронта от расчетного менее 60 нм)



б) интерферограмма двояковыпуклой линзы (среднеквадратичное отклонение волнового фронта от расчетного значения не более 65 нм)



в) микрофотография кружка рассеяния этой линзы ( $\lambda = 632,8$  нм, диаметр кружка рассеяния — 4 мкм, увеличение ~ 1000×)



г) фрагмент изображения стандартной миры (расчетное разрешение в центре поля зрения —  $620 \text{ мм}^{-1}$  при контрасте 0,1)

**Рис. 2.** Результаты экспериментальных исследований однокомпонентного коллиматорного объектива (двояковыпуклая линза с двумя идентичными реплицированными асферическими поверхностями) световым диаметром 20 мм и относительным отверстием 1:2

квалификации, хорошо владеющие искусством ретуши и притира. Важно и то, что до сих пор значительная часть оптических элементов современных объективов различного назначения имеет сферические рабочие поверхности.

В АО «НПО ГИПО» имеется опыт успешного изготовления КОЭ-зеркал диаметром до 700 мм [1].

Открывается перспектива организации автоматизированного конвейерного изготовления линз и зеркал, а также процессов сборки объективов на их основе. При этом специалисты-оптики высокой квалификации здесь не потребуются. Но они будут полностью задействованы на производственных участках изготовления и аттестации эталонных мастер-матриц, а также уникальных «штучных» и мелкосерийных изделий из стекла и других оптических материалов, где должны быть использованы предельные точностные возможности методов формообразования всех видов оптических поверхностей, как традиционных (ретушь, притир, полноразмерный прецизионный инструмент и др.), так и современных (алмазное микроточение, уникальные ультрапрецизионные оптические станки с числовым программным управлением и т.п.) [4].

Таким образом, оптическое производство примет совершенно другой облик. Произойдут поистине кардинальные преобразования: громоздкие и энергоемкие шлифовально-полировальные станки и даже высокопроизводительные оптические станки с числовым

программным управлением будут перемещены на заготовительные участки, обеспечивающие производство подложек для КОЭ заданных типоразмеров в требуемом количестве из стекла и других материалов, а основное серийное производство КОЭ и сборка объективов на их основе станут действительно оптически чистыми, высокоавтоматизированными и «малолюдными», подобно производству изделий современной микроэлектроники [4].

### Список источников

- [1] **Карлин, О. Г.** Изготовление и контроль асферической оптики / О. Г. Карлин, В. Г. Кукс, Л. Е. Липовецкий, А. В. Лукин, К. С. Мустафин, А. З. Хабиров, А. Г. Хуснутдинов. — М.: ЦНИИ Информации, 1980. — 272 с.
- [2] **Научно-технический сборник** «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (1957–1997 гг.). Часть 1 / Под ред. С.О. Мирумянца. — Казань: Изд-во «Дом печати», 1997. — С. 119–131.
- [3] **Лукин, А. В.** Реплицированная асферическая оптика: основные аспекты организации серийного и массового производства / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, М. М. Ахметов, А. В. Берденников, Гайнутдинов И. С. и др. // Контенант. — 2017. — Том 16. — № 2. — С. 167–172.
- [4] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42 – 50.

## Shaping technologies and methods of laser-holographic control of all types of aspherical optical surfaces. GIPO's contribution to the development in the field

*A. V. Lukin*

JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics» (GIPO), Kazan, Russia

The report considers the historical aspect and development trends of shaping technologies and methods of laser-holographic control of all types of aspherical optical surfaces in the context of GIPO's research activities.

*Keywords:* Aspherical optics, Shaping technologies, Laser-holographic control methods, Combined optical element, Precision replication, Master matrix, Historical aspect, Development trends.

# Сопоставительный анализ хроматизма склеенного нанокompозитного компонента и дифракционной линзы

Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров, С. В. Казин

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Успехи в области синтеза нанокompозитных оптических пластмасс позволили сблизить дисперсионные характеристики двухлинзового рефракционного склеенного компонента и дифракционной линзы. В настоящем докладе приводятся результаты сопоставительного анализа хроматизма положения и сферохроматизма такого компонента и дифракционной линзы. Показано, что при компоновке склеенного компонента из реальных нанокompозитов DIAM\_PMMA и ITO\_PMMA в видимом спектральном диапазоне ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм), а тем более в расширенном спектральном диапазоне ( $0,486 \leq \lambda \leq 0,9$  мкм), можно говорить лишь о некотором подобии склеенного компонента и дифракционной линзы. Степень подобия тем ближе, чем меньше фокусное расстояние дифракционной линзы, по сравнению с фокусным расстоянием склеенного нанокompозитного компонента.

*Ключевые слова:* Нанокompозитная оптическая пластмасса, Дифракционная линза, Хроматизм положения, Сферохроматизм.

*Цитирование:* Грейсух, Г. И. Сопоставительный анализ хроматизма склеенного нанокompозитного компонента и дифракционной линзы / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, О. А. Захаров, С. В. Казин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 29–35.

## Введение

Известно, что одиночная дифракционная линза (ДЛ) с небольшой оптической силой, включаемая в схему рефракционно-линзового объектива, позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже используя ограниченный набор оптических материалов, позволяющих изготавливать преломляющие поверхности прецизионной штамповкой [1–3]. В то же самое время зависимость дифракционной эффективности ДЛ от длины волны и угла падения излучения на ее микроструктуру в совокупности с технологическими сложностями, сопровождающими подавление вышеуказанной зависимости, по-прежнему остается главной проблемой, препятствующей широкому использованию ДЛ в изображающих оптических системах [4]. Поэтому успехи в области создания новых оптических материалов не редко рассматриваются в том числе с точки зрения возможной альтернативы ДЛ. Наиболее перспективными в этом направлении представляются новейшие нанокompозитные оптические пластмассы и, в частности, описанные в работах [5, 6].

Ранее самими разработчиками нанокompозитных пластмасс и авторами настоящего доклада было продемонстрировано, что эти материалы открывают не имеющие себе равных возможности в области подавления спектральной зависимости дифракционной эффективности ДЛ [7, 8]. В работе же [9] разработчиками нанокompозитных пластмасс склеенный компонент из таких материалов рассматривается уже как альтернатива ДЛ.

# 1. Условие эквивалентности хроматизма положения бесконечно тонкого склеенного рефракционного компонента (СРК) и ДЛ

Следуя работе [9] покажем при каких условиях продольный хроматизм бесконечно тонкого СРК с плоскими наружными преломляющими поверхностями (см. рисунок 1) и ДЛ будет строго совпадать. Оптическая сила компонента на расчетной длине волны  $\lambda_0$  (за которую обычно принимается центральная длина волны рабочего спектрального диапазона) описывается выражением:

$$\frac{1}{f(\lambda_0)} = \frac{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)}{r} . \quad (1)$$

На произвольной же длине волны оптическая сила равна

$$\frac{1}{f(\lambda)} = \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{r} = \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} \frac{1}{f(\lambda_0)} . \quad (2)$$

Отсюда

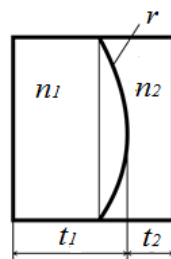
$$\frac{f(\lambda_0)}{f(\lambda)} = \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} . \quad (3)$$

У ДЛ соответствующее отношение имеет вид:

$$\frac{f_D(\lambda_0)}{f_D(\lambda)} = \frac{\lambda}{\lambda_0} . \quad (4)$$

Приравнявая правые части выражений (3) и (4), получаем искомое условие эквивалентности хроматизма положения бесконечно тонкого СРК и ДЛ:

$$\frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)} = \frac{\lambda}{\lambda_0} . \quad (5)$$



**Рис. 1.** СРК с плоскими наружными преломляющими поверхностями.

В бесконечно тонком варианте  $t_1 = t_2 = 0$

Если бы в склеенном компоненте, представленном на рисунке 1, границей раздела сред служила бы не преломляющая поверхность, а дифракционная пилообразная микроструктура, то условие независимости ее дифракционной эффективности от длины волны имело бы вид:

$$h(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)) = \lambda , \quad (6)$$

где  $h$  — глубина рельефа, равная

$$h = \frac{\lambda_0}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)}. \quad (7)$$

Подстановка формулы (7) в (6) приводит к формуле (5) из чего следует, что условие эквивалентности хроматизма положения бесконечно тонкого СРК и ДЛ точно совпадает с условием стопроцентной дифракционной эффективности двухслойной однорельефной микроструктуры.

В видимом спектральном диапазоне ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм) ни одна из известных пар оптических материалов строго не удовлетворяет условию (5), а наилучшее приближение обеспечивает пара нанокompозитных пластмасс Diamond in PMMA (Diam\_PMMA) и ITO in PMMA (ITO\_PMMA) [9]. Чтобы оценить потенциальные возможности СРК, которые могли бы быть достигнуты, если бы удалось синтезировать идеальную пару нанокompозитных пластмасс, строго удовлетворяющую условию (5), авторы доклада использовали, как это было предложено в работах [7] и [8], в паре с нанокompозитной пластмассой Diam\_PMMA математическую модель оптического материала ITO\_PMMA\_MM. Показатель преломления  $n_{mn}(\lambda)$  модельного материала при замене на него показателя преломления  $n_2(\lambda)$  обеспечивал строгое выполнение условия (5).

## 2. Результаты исследования

Сопоставительный анализ хроматизма СРК и ДЛ выполнялся с использованием программы оптического проектирования Zemax13 [10]. При этом преломляющие поверхности СРК моделировались поверхностями типа «Standard», дисперсионные формулы используемых материалов, представленные, в частности, в работах [7, 8], включались в каталог MISC программы Zemax13. ДЛ моделировалась поверхностью типа «Binary 2», а продольный хроматизм оценивался функцией «Chromatic Focal Shift», имеющей вид:

$$\Delta f(\lambda) = f(\lambda) - f(\lambda_0). \quad (8)$$

На первом этапе анализировался бесконечно тонкий СРК с плоскими наружными преломляющими поверхностями, скомпонованный из реальной нанокompозитной пластмассы и математической модели оптического материала. Он подтвердил, что при равных фокусных расстояниях на расчетной длине волны, функции «Chromatic Focal Shift» СРК и ДЛ строго совпадают.

Что касается сферохроматизма, то его соотношение зависит от ширины рабочего спектрального диапазона и других условий сравнения. Так, в частности, при  $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм, расположении предмета на бесконечности, фокусном расстоянии СРК и ДЛ на  $\lambda_0=0,55$  мкм, равном 40 мм и световом диаметре 5 мм, сферохроматизм СРК примерно в 5 раз выше, чем у ДЛ.

В области же монохроматических aberrаций принципиальным отличием СРК от ДЛ является неустранимость кривизны Петцваля. Если у ДЛ радиус поверхности Петцваля всегда бесконечен, то у СРК [9]:

$$R_{Petz} = -n_1(\lambda_0)n_2(\lambda_0)f(\lambda_0). \quad (9)$$



Увеличить  $R_{Petz}$  путем перехода от плоских наружных преломляющих поверхностей к сферическим невозможно, так как это приводит к нарушению эквивалентности СРК и ДЛ по продольному хроматизму.

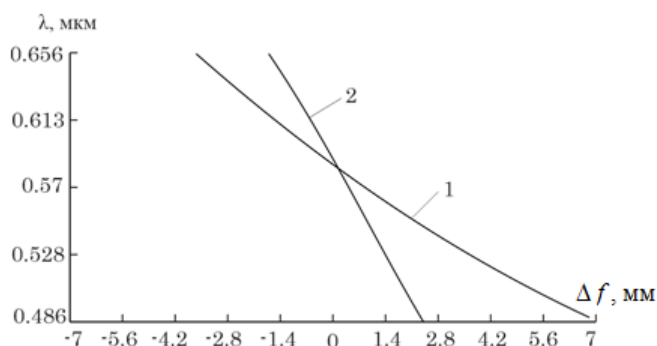
Практическое использование СРК невозможно без перехода к конечным толщинам пары склеенных линз. Анализ показал, что достижение хотя бы минимально допустимой толщины фронтальной DIAM\_РММА линзы при сохранении характера кривой функции «Chromatic Focal Shift» и величины ее максимального размаха требует дополнительного включения радиусов двух наружных преломляющих поверхностей и резкого увеличения толщины второй линзы. В результате СРК с приемлемыми толщинами можно получить только при очень большом диафрагменном числе  $F\# \geq 13$ . Ограничение  $F\#$  снизу обусловлено острым краем тонкой линзы СРК. Это ограничение можно преодолеть только путем асферизации одной или обеих поверхностей тонкой линзы.

Завершался сопоставительный анализ оценкой сегодняшних возможностей СРК, компонуемых из предложенной в [9] пары нанокompозитных пластмасс Diam\_РММА и ИТО\_РММА.

Этот анализ показал, что:

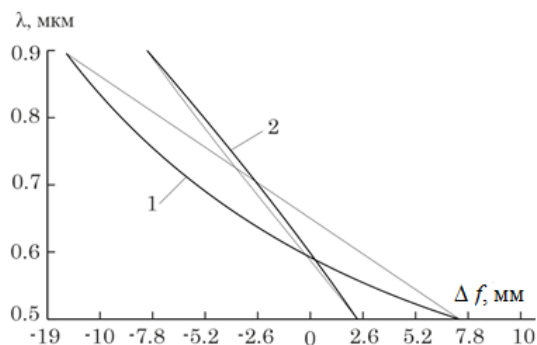
- в бесконечно тонком варианте как с плоскими, так и со сферическими (асферическими) наружными преломляющими поверхностями эквивалентность функций «Chromatic Focal Shift» СРК и ДЛ, имеющих одинаковую оптическую силу, недостижима;

- при использовании для сближения функций «Chromatic Focal Shift» СРК и ДЛ трех радиусов кривизны поверхностей и обеих толщин (с ограничениями на толщины обеих линз  $0,15 \leq t \leq 0,20$  мм) та или иная степень подобия может быть достигнута только если фокусное расстояние ДЛ меньше фокусного расстояния СРК. Само же соотношение фокусных расстояний зависит прежде всего от выбора рабочего спектрального диапазона. Так в F-d-C спектральном диапазоне ( $0,486 \leq \lambda \leq 0,656$  мкм) фокусные расстояния должны различаться как минимум в 2,5 раз, а в расширенном спектральном диапазоне F-d-0,9 ( $0,486 \leq \lambda \leq 0,9$  мкм) – в 1,8 раза (см. рисунки 2–5).

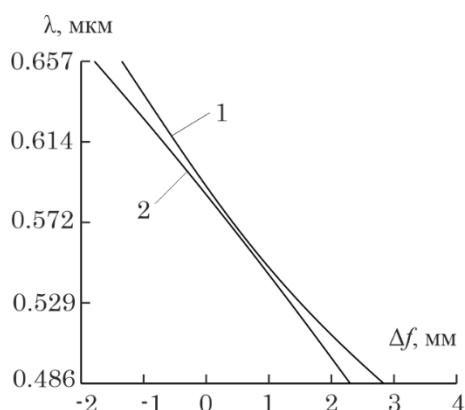


**Рис. 2.** Кривые  $\Delta f(\lambda)$  для ДЛ и СРК при  $f(\lambda_0) = 35$  мм в спектральном диапазоне F-d-C:

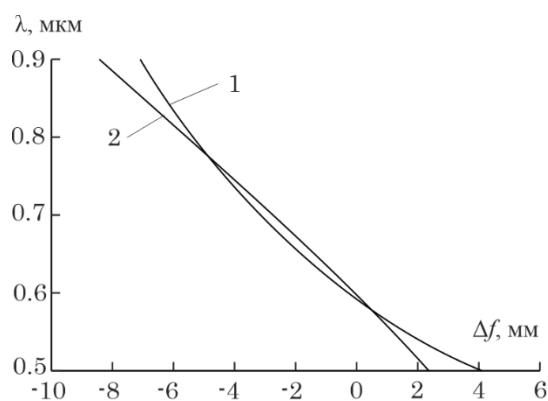
1 — для ДЛ,  $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 10,97$  мм ; 2 — для СРК,  $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 4,09$  мм



**Рис. 3.** Кривые  $\Delta f(\lambda)$  для ДЛ и СРК при  $f(\lambda_0) = 35$  мм в спектральном диапазоне F-d-0,9:  
 1 – для ДЛ,  $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 19,49$  мм ; 2 – для СРК,  $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 10,71$  мм



**Рис. 4.** Кривые  $\Delta f(\lambda)$  для ДЛ при  $f(\lambda_0) = 13$  мм (1) и СРК при  $f(\lambda_0) = 35$  мм (2) в спектральном диапазоне F-d-C;  $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 4,08$  мм



**Рис. 5.** Кривые  $\Delta f(\lambda)$  для ДЛ при  $f(\lambda_0) = 19,3$  мм (1) и СРК при  $f(\lambda_0) = 35$  мм (2) в спектральном диапазоне F-d-0,9;  $f(\lambda_F) - f(\lambda_C) = 10,71$  мм

Кривые на рисунках 3, 5 наглядно демонстрируют, что в расширенном спектральном диапазоне кривые  $\Delta f(\lambda)$  для ДЛ и СРК отличаются не только размахом, но и формой: кривая для ДЛ вогнутая, а для СРК – выпуклая. Кривые на рисунках 3, 4 кроме того показывают, что при фокусных расстояниях, обеспечивающих равенство размахов кривых  $\Delta f(\lambda)$  СРК и ДЛ, кривые, соответствующие ДЛ, сдвинуты по оси абсцисс вправо. Отсюда следует, что в коротковолновой части рабочего спектрального диапазона хроматизм положения ДЛ превалирует над хроматизмом СРК, а в длинноволновой – наоборот.

### Заключение

В видимом спектральном диапазоне (при  $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм) при приемлемых толщинах линз СРК ( $0,15 < t < 1,5$  мм) этот компонент и ДЛ можно с достаточной степенью точности считать эквивалентными с точки зрения продольного хроматизма при нижеследующих условиях:

- компонент состоит из реального нанокompозита и математической модели (например, DIAM\_РММА и ИТО\_РММА\_ММ);
- диафрагменное число  $F \geq 13.4$  (Это ограничение обусловлено острым краем тонкой линзы СРК. Его можно преодолеть путем асферизации фронтальной поверхности тонкой линзы).

При компоновке СРК из реальных нанокompозитов DIAM\_PMMA и ITO\_PMMA в видимом спектральном диапазоне, а тем более в расширенном спектральном диапазоне ( $0,486 \leq \lambda \leq 0,9$  мкм), можно говорить лишь о некотором подобии СРК и ДЛ. Степень подобия тем ближе, чем меньше фокусное расстояние ДЛ, по сравнению с фокусным расстоянием СРК.

Таким образом, простая эквивалентная замена в оптической системе ДЛ на нанокompозитный СРК скорее всего невозможна. В то же время уникальные дисперсионные свойства нанокompозитных пластмасс DIAM\_PMMA и ITO\_PMMA позволяют надеяться на существенное повышение эффективности коррекции хроматизма чисто рефракционных пластмассово-линзовых оптических систем.

### **Благодарность**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

### **Список источников**

- [1] Greisukh G. I. et al. Design of achromatic and apochromatic plastic micro-objectives // Applied Optics. – 2010. – Т. 49. – №. 23. – С. 4379-4384.
- [2] Greisukh G. I. et al. Design of plastic diffractive–refractive compact zoom lenses for visible–near-IR spectrum // Applied Optics. – 2013. – Т. 52. – №. 23. – С. 5843-5850.
- [3] Greisukh G. I. et al. Layout and calculation of a refractive-diffraction objective of a periscope type for a mobile communication device // J Opt Techn. – 2016. – Т. 83. – №. 11. – С. 687-691.
- [4] Greisukh G. I. et al. Single-layer kinoforms for cameras and video cameras of mobile communication devices // Computer Optics. – 2017. – Т. 41. – №. 2. – С. 218-226.
- [5] Werdehausen D. et al. Design rules for customizable optical materials based on nanocomposites // Optical Materials Express. – 2018. – Т. 8. – №. 11. – С. 3456-3469.
- [6] Werdehausen D. et al. Dispersion-engineered nanocomposites enable achromatic diffractive optical elements // Optica. – 2019. – Т. 6. – №. 8. – С. 1031-1038.
- [7] Isaevich G. G. et al. Potential opportunities of sawtooth diffraction microstructure with two layers and single relief // Journal of Optics. – 2020. – Т. 22. – №. 8. – С. 085604.
- [8] Greisukh G. I. et al. Limiting spectral and angular characteristics of multilayer relief–phase diffraction microstructures // Quantum Electronics. – 2020. – Т. 50. – №. 7. – С. 623.
- [9] Seesselberg M., Werdehausen D. How to replace diffractive optical elements for color correction by refractive lenses from specific materials // International Optical Design Conference. – Optical Society of America, 2021. – С. 120780K.
- [10] Zemax [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zemax.com/products/opticstudio>

## **Comparative analysis of chromatism of a glued nanocomposite component and a diffractive lens**

*G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, O.A. Zakharov, S.V. Kazin*

Penza State University of Architecture and Construction Penza, Russia

Advances in the field of synthesis of nanocomposite optical plastics have made it possible to bring the dispersion characteristics of a two-lens refractive glued component and a diffractive lens closer together. This report presents the results of a comparative analysis of the longitudinal chromatism

and spherochromatism of such component and the diffractive lens. It is shown that when a glued component is assembled from real DIAM\_PMMA and ITO\_PMMA nanocomposites in the visible spectral range ( $0.4 \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$ ), and even more so in the extended spectral range ( $0.48 \leq \lambda \leq 0.9 \mu\text{m}$ ), one can only speak of some similarity between the glued component and a diffractive lens. The degree of similarity is the closer, the smaller the focal length of the diffractive lens, compared to the focal length of the glued nanocomposite component.

*Keywords:* Nanocomposite optical plastic, Diffractive lens, Longitudinal chromatism, Spherochromatism.

# Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы — обзор

*Р. С. Стариков*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящем обзорном докладе рассматриваются современные достижения в области применения методов искусственного интеллекта для синтеза голографических и дифракционных элементов, а также обсуждаются новейшие реализации нейроподобных дифракционных оптико-цифровых систем обработки информации.

*Ключевые слова:* Компьютерно синтезированные голограммы, Компьютерно синтезированные дифракционные оптические элементы, Глубокое обучение, ИИ, Оптико-цифровые системы, Голографическая обработка информации.

*Цитирование:* **Стариков, Р. С.** Интеллектуальный голографический синтез и нейроподобные оптико-цифровые дифракционные системы — обзор / Р. С. Стариков // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 36–37.

В настоящее время методы искусственного интеллекта получают всё более широкое практическое применение в самых различных областях. С одной стороны, это обусловлено ростом доступных вычислительных ресурсов для реализации нейронных сетей глубокого обучения, при этом, с другой стороны, такой прогресс предъявляет требования к ещё большему наращиванию таких ресурсов. В данном кратком обзоре обсуждаются актуальные возможности методов глубокого обучения применительно к ряду задач голографии и оптической обработки информации, приводятся новейшие мировые достижения в данной области, а также некоторые оригинальные результаты. В докладе рассматриваются, главным образом, три направления исследований: 1) нейросетевые методы компьютерного синтеза голограмм и дифракционных элементов; 2) нейросетевые методы в цифровой голографии и 3) оптико-цифровые голографические нейроподобные системы обработки информации. Кроме того, отдельно представлены недавние примеры попыток коммерциализации интеллектуальных оптико-голографических систем. В качестве особого передового направления исследований в рассматриваемой области выделены работы по созданию высокопроизводительных средств реализации искусственного интеллекта на базе дифракционных и голографических оптико-цифровых систем; обсуждаются наиболее впечатляющие новейшие экспериментальные результаты в области их создания.

# AI-holography and neural-like diffractive optical-digital data processing systems — a review

*R. S. Starikov*

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

This review presents advances in the application of AI-methods for the synthesis of holographic diffractive elements, and also discusses the newest realizations of neural-like diffractive optical-digital information processing systems.

*Keywords:* Computer generated holograms, Computer generated diffraction optical elements, Deep learning, AI, Optical-digital systems, Holographic data processing.

# Обзор современных оптических технологий для защиты банкнот

*Л. И. Смирнов, А. А. Дудкина*

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «КРИПТЕН», Дубна, Россия

В данном обзоре рассмотрены современные инновационные решения ведущих компаний-производителей оптических защитных элементов с учетом требований Центральные банков и политики ориентированности на конечных пользователей.

*Ключевые слова:* Защитный элемент, Банкнота, Идентификация подлинности.

*Цитирование:* **Смирнов, Л. И.** Обзор современных оптических технологий для защиты банкнот / Л. И. Смирнов, А. А. Дудкина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 38–39.

В настоящее время использование оптических защитных технологий остается ведущим решением в области защиты и проверки подлинности защищенных документов, в том числе банкнот. При создании новых продуктов, перед компаниями стоят следующие задачи: обеспечение высокого уровня защиты от подделки, и в то же время легкого алгоритма проверки подлинности (как машинным, так и наглядным образом), стоимость и экологичность производства, комфорт в использовании.

В данном обзоре раскрываются варианты решений защитных элементов для банкнот, которые ведущие компании-производители презентовали за последние два года.

Французская компания Oberthur Fiduciaire представила трехмерный защитный элемент RELIEF™, обеспечивающий визуальные эффекты с уникальной оптической интенсивностью и контрастностью с широким выбором цветовой гаммы.

Этой весной компания KURZ представила новую разработку на основе микролинз KINEGRAM DYNAMIC™. Сферические микролинзы, которые видно с любой перспективы и при любом освещении, создают захватывающую глубину и динамичное движение. Kinegram Dynamic — это оптимальная интеграция эффектов одномерной муаровой линзы с хорошо известными движениями тонких линий Kinegram, создающая визуальные эффекты, которые являются новым дополнением к широкому спектру доступных эффектов Kinegram.

Компания HUECK FOLIEN презентовала инновационный продукт - TRILUMIC™. В основу данного продукта легло запатентованное решение, в котором защитный элемент имеет по меньшей мере одну цветопеременную область, область со структурами, которые отражают мотив изображения в разные пространственные области, так что для пользователя создается динамичное изображение в случае соответствующего движения источника света, а также в случае изменения угла наблюдения. При этом перемещение источника света и/или изменение угла наблюдения одновременно вызывает перемещение мотива изображения и эффект смещения цвета. Уникальность продукта заключается в том, что эта защитная функция позволяет создавать очень яркое УФ-излучение.

Компания Meta Materials Inc. представила запатентованную технологическую платформу KolourOptik, основанную на оптически переменных устройствах и поверхностном плазмонном резонансе наноструктуры, чтобы представить продукт чтобы доставить свой KolourOptik Stripe. Компания использует технологии субволновых наноструктур, обеспечивающих точную закономерность и периодичность длины волны света, отраженного структурой. Одно из ключевых преимуществ KolourOptik - ультратонкий форм-фактор, поэтому защитная функция может быть нанесена на поверхность при использовании существующего прикладного оборудования на различные подложки для банкнот.

Компания, входящая в IQS Group ориентирована на разработку защитных элементов с использованием электронно-лучевой и лазерной литографии, 3D-нанопечати и наноимпринта. Особенностью разработок является использование нехроматических элементов (буквы, цифры, геометрические объекты). При наклоне защитного элемента нехроматические элементы увеличиваются в зависимости от сложности элементов.

Таким образом, перед компаниями-производителями стоит актуальная задача оптимального совмещения передовых защитных технологий и современного дизайна.

Ведущие компании-производители в предлагаемых решениях делают акцент на следующих аспектах: банкнота должна быть приятна в использовании благодаря визуальным и тактильным характеристикам, сложность оптических элементов должна обеспечивать высокий уровень защиты банкнот от подделки, а также легкую идентификацию банкнот машинным способом в том числе для криминалистических целей.

#### **Список источников**

- [1] **Banknote Industry News GmbH**, Features // Banknote industry report — 2022. № 8. — P. 28–72.
- [2] **Патент № 3800060 EP**. Security element having at least one first color-shifting / Wurth Sonja, Mayrhofer Marco, — Оpubл. 08.04.2021.

## **Review of modern optical technologies of banknotes security**

*L. I. Smirnov, A. A. Dudkina*

JSC RPC KRYPTEN, Dubna, Russia

The review observes modern optical security features and technologies of banknotes security.

*Keywords:* Security device, Banknote, Identification.



# Полностью оптический шейпинг трёхмерного солитона самоиндуцированной прозрачности в парах $^{87}\text{Rb}$

С. Н. Багаев<sup>1</sup>, И. Б. Мехов<sup>2</sup>, И. А. Чехонин<sup>2</sup>, М. А. Чехонин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт Лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Впервые экспериментально исследованы солитоны теории самоиндуцированной прозрачности (SIT) лазерных импульсов со сходящимся цилиндрическим волновым фронтом в парах  $^{87}\text{Rb}$  (резонансный переход  $D_2$ , длина волны 780,24 нм). Целью работы является разработка прототипов новой элементной базы резонансной радиофотоники (quantum microwave photonics) для лазерного процессинга сигналов в СВЧ области спектра. В каустике пучка лазерного импульса накачки  $E(t,x) = E(t) \cdot f(x)$  пространственный профиль поля имел вид или  $f(x) = G(x)$  (функция Гаусса), или  $f(x) = \sin(x)/x$ . Обсуждается эффективность применения разработанных нами компьютерных синтезированных голограмм (CGH) для создания произвольного пространственного профиля импульса накачки  $f(x)$ . Импульсная мощность лазера не превышала 8.5 мВт при длительности импульса 4–5 нс, временное разрешение системы регистрации — 27 пс. В проведённых экспериментах показано, что полностью оптический контроль несущей частоты входного импульса  $E(t)$  определяет величину шейпинга выходного импульса — (i) величину компрессии длительности выходного импульса (строб-импульс), (ii) величину оптической задержки солитона, (iii) величину гетеродинамирования несущей частоты солитона.

*Ключевые слова:* Самодифракция, Площадь импульса, Радиофотоника, Компьютерная синтезированная голограмма.

*Цитирование:* Багаев, С. Н. Полностью оптический шейпинг трёхмерного солитона самоиндуцированной прозрачности в парах  $^{87}\text{Rb}$  / С. Н. Багаев, И. Б. Мехов, И. А. Чехонин, М. А. Чехонин // NOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 40–45.

## Введение

Впервые трехмерные солитоны обобщенной теории самоиндуцированной прозрачности (SIT) экспериментально наблюдались в [1] для случая сходящегося сферического волнового фронта импульса. Теория трехмерных солитонов для сходящегося сферического волнового фронта с гауссовым распределением поля по радиусу  $E(t,r) = E(t) \cdot G(r)$  была развита в последующих работах, в которых этот эффект получил название «Supertransparency» [2–4].

Теоретически было показано, что  $2\pi$ -импульс (солитон классической теории самоиндуцированной прозрачности МакКола–Хана) является лишь *частным случаем* трехмерного солитона при том условии, что падающий лазерный импульс имеет идеальный плоский волновой фронт.

## 1. Экспериментальная установка

В данной работе сообщается о наблюдении трехмерных солитонов SIT для случая цилиндрического волнового фронта импульса с пространственным профилем поля в

каустике сфокусированного пучка  $E(t,x) = E(t) \cdot f(x)$  в виде  $f(x) = G(x)$  (функция Гаусса) или  $f(x) = \sin(x)/x$ .

Лазер накачки состоит из непрерывного одночастотного лазерного диода с шириной линии генерации 100 кГц, который может перестраиваться вблизи частоты резонансной линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  ( $\lambda = 780.24$  нм). Дискретная перестройка частоты генерации в пределах  $\pm 3500$  МГц в окрестности линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  производится изменением тока инжекции задающего лазерного диода с помощью программируемого в LabVIEW DAQ-устройства NI USB-6363.

Лазерный диод является задающим генератором для импульсного лазерного усилителя.

Полупроводниковый лазерный усилитель возбуждается наносекундным генератором тока. На выходе усилителя формируется лазерный импульс с длительностью 4–5 нс и мощностью 10 мВт с частотой повторения импульсов 200 кГц. Таким образом, энергия импульса не превышает 40 пДж.

Параллельный гауссовый пучок диаметром 800 мкм направляется на регулируемую оптическую щель. Затем в фокальной плоскости цилиндрической линзы с фокусным расстоянием  $F = 100$  мм формируется необходимый профиль лазерного пучка накачки  $E(x)$  в резонансной ячейке с парами рубидия.

В случае пространственного профиля в виде функции Гаусса, его размер по координате  $x$  составляет 20 мкм, распределение  $E(x)$  в каустике пучка имеет вид:  $E(x) = E_0 \cdot \exp[-(x/\sigma)^2]$ ,  $\sigma = 0,017$  мм.

При формировании пространственного профиля поля с помощью оптической щели в виде дифракционного паттерна  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ ,  $E(x) = E_0 \cdot \text{sinc}(\beta x)$ , ( $\beta = 24,3$  мм $^{-1}$ ).

Лазерный импульс накачки фокусируется цилиндрической линзой в ячейку с изотопически чистым рубидием  $^{87}\text{Rb}$ . Концентрация атомов Rb изменяется от  $N_0 = 1,87 \cdot 10^{10}$  см $^{-3}$  ( $T = 32,0$  °C) до  $N_0 = 4,08 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$  ( $T = 98,0$  °C).

Излучение, выходящее из ячейки, проецируется объективом на торец одномодового световода диаметром 10 мкм и направляется в Single Photon Avalanche Diode (SPAD).

Импульсы от одиночных фотонов, сформированные SPAD, поступают в многоканальный временной анализатор, который формирует временную гистограмму зарегистрированных фотонов – число фотонов на временной канал. Число каналов – 4096. Временное разрешение всей системы регистрации определяется временным разрешением применённого SPAD и составляет 27 пс.

## 2. Полученные результаты

Трёхмерные солитоны SIT были обнаружены в экспериментах с импульсами накачки, имеющими пространственный профиль накачки в виде функции Гаусса:  $E(x) = E_0 \cdot \exp[-(x/\sigma)^2]$ ,  $\sigma = 0,017$  мм при концентрации атомов рубидия  $N_0 = 8,93 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ .

Затем трёхмерные солитоны SIT были воспроизведены и для иного пространственного профиля поля вида  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ ,  $E(x) = E_0 \cdot \text{sinc}(\beta x)$ , ( $\beta = 24,3$  мм $^{-1}$ ) при концентрации атомов рубидия  $N_0 = 4,08 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ .

Выходные импульсы из ячейки с рубидием регистрировались под углом  $\varphi = 0$ .

На рисунке 1 приведены формы выходных лазерных импульсов при отстройке частоты лазера в длинноволновую область спектра от частоты резонанса атомов рубидия.

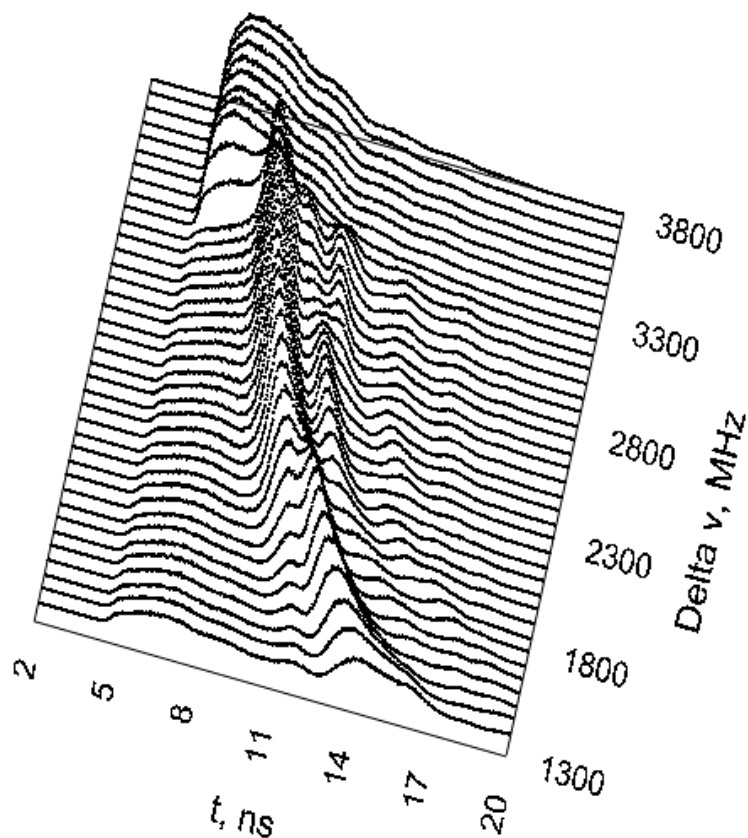
Как видно на рисунке 1, на длинноволновом крыле линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  наблюдается формирование трехмерного солитона SIT с крутым передним фронтом, компрессией длительности в 3–4 раза и его задержкой во времени (см. также рис. 2). Временная задержка солитона сокращается при увеличении  $\Delta\nu$ . Соответственно, скорость солитона увеличивается от  $C/30$  до  $C/6$ . Энергия импульса при распространении в плотной резонансной поглощающей среде практически не изменяется.

При дальнейшем увеличении расстройки  $\Delta\nu$  происходит скачкообразный возврат формы выходного импульса к форме входного импульса (см. рисунки 1 и 2б).

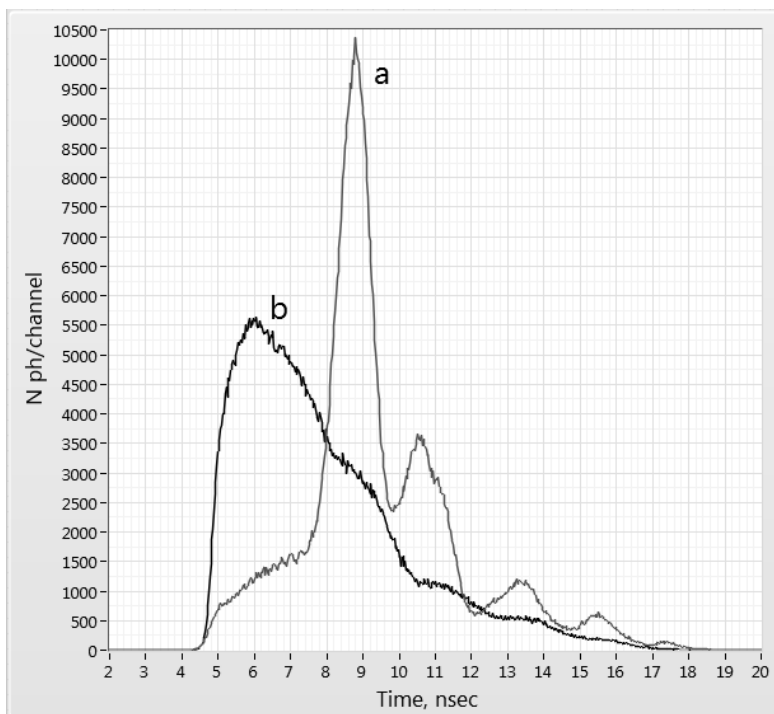
В соответствии с существующей теорией, при перестройке частоты лазера на коротковолновом крыле линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  солитон SIT не наблюдается (см. рисунок 3). Как видно на рисунке 3, при уменьшении частотной расстройки  $\Delta\nu$  наблюдается лишь затягивание переднего фронта импульса и появление дополнительных осцилляций на заднем фронте импульса.

Важно отметить, что солитон МакКола–Хана классической теории самоиндуцированной прозрачности (SIT) (для плоского волнового фронта) должен возникать при совпадении частоты лазерного импульса с частотой атомного резонанса линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  ( $\Delta\nu = 0$ ).

Однако, как показывают данные эксперименты, при сходящемся цилиндрическом волновом фронте трехмерный солитон SIT возникает только на длинноволновом крыле линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  (см. рисунок 1).

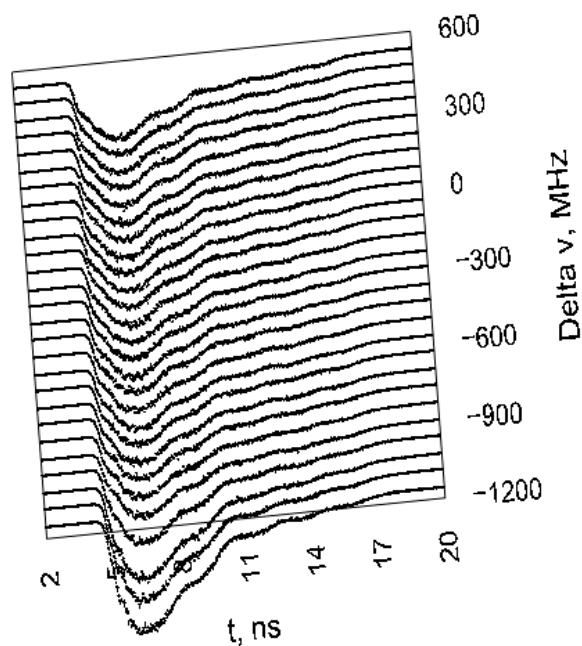


**Рис. 1.** Форма выходного импульса при изменении расстройки  $\Delta\nu$  импульса накачки в длинноволновой области спектра перехода  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$ . "Delta  $\nu$ , MHz" = " $\Delta\nu$ , MHz"



(a) форма солитона SIT при  $\Delta\nu = 2692$  МГц в длинноволновой области спектра перехода  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$   
 (b) форма выходного импульса при  $\Delta\nu = 3414$  МГц в длинноволновой области спектра перехода  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$ .  
 При данной частотной расстройке  $\Delta\nu$  солитон SIT отсутствует

**Рис. 2.** Форма выходного импульса из ячейки с  $^{87}\text{Rb}$



**Рис. 3.** Форма выходного импульса при изменении расстройки  $\Delta\nu$  импульса накачки в коротковолновой области спектра перехода D2 87Rb. "Delta v, MHz" = " $\Delta\nu$ , MHz"

### Заключение

В заключение следует сделать одно существенное замечание. Насколько нам известно, существующая теория трехмерных солитонов SIT разработана только для сходящегося сферического волнового фронта с гауссовым распределением амплитуды по радиусу  $E(r)$ .

Как показывают проведённые эксперименты, эффект образования трёхмерных солитонов SIT теперь наблюдается в гораздо более широких условиях — для сходящегося цилиндрического волнового фронта с различным пространственным профилем  $f(x)$ : функцией Гаусса  $G(x)$  и  $\sin(x)/x$ . Фундаментальная теория таких солитонов в настоящее время отсутствует.

В проведённых экспериментах показано, что полностью оптический контроль несущей частоты входного импульса  $E(t)$  определяет величину шейпинга выходного импульса — (i) величину компрессии длительности выходного импульса (строб-импульс), (ii) величину оптической задержки солитона, (iii) величину гетеродинирования несущей частоты солитона.

### Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17–19–01097.

### Список источников

- [1] **Egorov, V. S.** Characteristics of coherent propagation of a superradiant pulse through an optically dense resonantly absorbing medium / V. S. Egorov, N. M. Reutova // Optics and Spectroscopy. — 1989. — Vol. 66. — № 6. — P. 716–718.
- [2] **Козлов, В. В.** К теории самоиндуцированной прозрачности в сфокусированном световом пучке / В. В. Козлов, Э. Е. Фрадкин // Письма в ЖЭТФ. — 1991. — Том 54. — № 5. — С. 266–269.

- [3] **Egorov, V. S.** Supertransparency of a resonantly absorbing medium for short pulses with a nonplane wave front / V. S. Egorov, E. E. Fradkin, V. V. Kozlov, N. M. Reutova // *Laser Physics*. — 1992. — Vol. 2. — P. 973.
- [4] **Kozlov, V. V.** Supertransparency / V. V. Kozlov, E. E. Fradkin, V. S. Egorov, N. M. Reutova // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 1996. — Vol. 110. — P. 1688–1711.

## All-optical shaping of a 3D self-induced transparency soliton in $^{87}\text{Rb}$ vapours

*S. N. Bagayev<sup>2</sup>, I. B. Mekhov<sup>1</sup>, I. A. Chekhonin<sup>1</sup>, M. A. Chekhonin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Institute of Laser Physics, Novosibirsk, Russia

We experimentally study for the first time the solitons of self-induced transparency of laser pulses with converging cylindrical wave front in  $^{87}\text{Rb}$  vapours (the  $D_2$  resonant transition of the 780.24 nm wavelength). Our aim is the development of prototypes for new devices of quantum microwave photonics for laser signal processing in the super high frequency range (microwave range). In the caustic of the pump laser pulse  $E(t,x) = E(t) \cdot f(x)$ , the spatial field profile was either  $f(x) = G(x)$  (Gaussian), or  $f(x) = \sin(x)/x$ . We discuss the efficiency of the developed synthesised computer generated holograms (CGH) for creation of an arbitrary spatial profile of the pump pulse  $f(x)$ . The pulse laser power did not exceed 8.5 mW at the pulse duration of 4–5 ns, the temporal resolution of the system was 27 ps. In the experiments we have shown that the all-optical control of the carrier frequency of the input pulse  $E(t)$  defines the value of the shaping of the output pulse: (i) the value of the compression of the output pulse (strobe-pulse), (ii) the value of the optical delay of the soliton, and (iii) the value of the heterodyning of the soliton carrier frequency.

*Keywords:* Self-induced transparency, Soliton, Quantum microwave photonics, Computer generated hologram.

# Одновременная генерация $N$ когерентных импульсов с различной площадью при самодифракции в парах $^{87}\text{Rb}$

С. Н. Багаев<sup>1</sup>, И. Б. Мехов<sup>2</sup>, И. А. Чехонин<sup>2</sup>, М. А. Чехонин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт Лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Целью работы является разработка прототипов новой элементной базы резонансной радиофотоники (quantum microwave photonics) для лазерного процессинга сигналов в СВЧ области спектра. Экспериментально исследован процесс одновременного излучения  $N$  когерентных резонансных импульсов с различной площадью ( $-3\pi \dots 0 \dots 3\pi$ ) из короткой каустики (0.1 ... 1 мм) резонансного лазерного импульса накачки. При самодифракции импульса накачки число излучаемых сигнальных импульсов с различной площадью достигало  $N = 16$ . Импульсы были разделены по углу распространения в интервале  $[-5^\circ \dots + 4^\circ]$ . В проведённых экспериментах показано, что эффект резонансной самодифракции короткого импульса может использоваться в качестве метода шейпинга площади импульса. Импульс накачки имел сходящийся цилиндрический волновой фронт в парах  $^{87}\text{Rb}$  (резонансный переход  $D_2$ , длина волны 780,24 нм). Импульсная мощность лазера не превышала 8,5 мВт при длительности импульса 4–5 нс, временное разрешение системы регистрации — 27 пс. Система регистрации позволяла регистрировать не только временной профиль поля излучения поляризации среды  $E_p(t)$ , но также её знак. В каустике лазерного импульса накачки  $E(t, x) = E(t) \cdot f(x)$  пространственный профиль поля имел вид функции Гаусса:  $f(x) = \exp[-(x/s)^2]$ ,  $s = 0,017$  мм. Обсуждается эффективность применения разработанных нами компьютерных синтезированных голограмм (CGH) для создания произвольного пространственного профиля импульса накачки  $f(x)$ . Случаю нулевой площади импульса соответствует процесс нелинейной генерации 0п-импульса с ненулевой энергией. Отмечается, что такой способ генерации 0п-импульса на малой длине нелинейного взаимодействия со средой предложен впервые.

*Ключевые слова:* Самодифракция, Площадь импульса, Радиофотоника, Компьютерная синтезированная голограмма.

*Цитирование:* Багаев, С. Н. Одновременная генерация  $N$  когерентных импульсов с различной площадью при самодифракции в парах  $^{87}\text{Rb}$  / С. Н. Багаев, И. Б. Мехов, И. А. Чехонин, М. А. Чехонин // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 46–51.

## Введение

Проблема быстрой угловой развёртки лазерного излучения является одной из сложных задач управления параметрами лазерного излучения [1]. В [2–3] нами был предложен новый принцип контроля угла распространения лазерного излучения в течение короткого импульса накачки вследствие динамики светоиндуцированной дифракционной решётки резонансной поляризации среды (Раби-дефлектор или Раби-шейпер). В таком методе пространственный период решётки поляризации среды изменяется во времени и управляется текущей "площадью" импульса накачки  $\theta_{in}(t)$ .

Как известно, лазерные импульсы с шейпированной во времени амплитудой, частотой, фазой и волновым вектором  $K$  возбуждают атомы и молекулы более эффективно [4], что может быть использовано в задачах полностью оптического сигнального процессинга и в квантовых технологиях. Обзор современных линейных методов шейпирования импульсов приведен в [5].

В данной работе представлено исследование нелинейного преобразования формы и площади импульса вследствие эффектов самодифракции лазерного импульса накачки с цилиндрическим волновым фронтом в резонансной среде паров рубидия. Преобразование площади выходного импульса происходит в широком диапазоне ( $-3\pi \dots 0 \dots 3\pi$ ). Серия  $N$  выходных импульсов может быть легко разделена по величине их площади благодаря различию их углов самодифракции  $\varphi$  в резонансной среде.

$2\pi$ -импульсы и  $0\pi$ -импульсы являются классическими объектами резонансной атомной оптики. Согласно теории самоиндуцированной прозрачности МакКола–Хана, их площадь сохраняется при распространении в резонансной среде. После прохождения импульса атомная система возвращается в своё исходное состояние. Это свойство очень важно для задач оптического сигнального процессинга, т.к. в этом случае предельная частота следования обрабатываемых сигналов ограничивается только их длительностью.

Однако, у  $0\pi$ -импульсов есть несколько замечательных свойств, которые отсутствуют у  $2\pi$ -импульсов. В случае, когда волновой фронт  $2\pi$ -импульса отличается от плоского фронта, он теряет устойчивость при распространении в среде на большие расстояния. В тоже время,  $0\pi$ -импульс может иметь произвольный волновой фронт при сохранении устойчивости.

$0\pi$ -импульсы также устойчивы к вырождению резонансного перехода и наличию у перехода неоднородного уширения.

Теория превращения импульса малой площади в  $0\pi$ -импульс была приведена в [6] и подтверждена многочисленными экспериментами с классическими полями, см., например, [7]. Впоследствии образование резонансных  $0\pi$ -импульсов наблюдалось для однофотонных волновых пакетов [8, 9]. Преобразование импульса малой площади в  $0\pi$ -импульс при распространении в резонансной среде является квазилинейным фазовым эффектом и требует большой длины взаимодействия и плотности атомов резонансной среды  $N_0$ .

В данном докладе мы демонстрируем новый нелинейный метод шейпирования импульсов с использованием эффектов нелинейной самодифракции импульсов в резонансных средах [2, 3].

## 1. Экспериментальная установка

Описание экспериментальной установки и метода обработки сигналов приведено в [3].

Лазер накачки состоит из непрерывного одночастотного лазерного диода с шириной линии генерации 100 кГц, который может перестраиваться вблизи частоты резонансной линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  ( $\lambda = 780.24$  нм). Дискретная перестройка частоты генерации в пределах  $\pm 100$  МГц в окрестности линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  производится изменением тока инжекции задающего лазерного диода с помощью программируемого в LabVIEW DAQ-устройства NI USB-6363.



Лазерный диод является задающим генератором для импульсного лазерного усилителя.

Полупроводниковый лазерный усилитель возбуждается наносекундным генератором тока. На выходе усилителя формируется лазерный импульс с длительностью 5.15 нс и мощностью 10 мВт с частотой повторения импульсов 200 кГц. Таким образом, энергия импульса не превышает 40 пДж.

Площадь импульса накачки была равна  $\theta_{in} = 3\pi$ .

Параллельный гауссовый пучок диаметром 800 мкм фокусируется цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 100 мм. В фокальной плоскости линзы формируется необходимый профиль лазерного пучка накачки  $E(x)$  в резонансной ячейке с парами рубидия.

В случае профиля в виде функции Гаусса, его размер по координате  $x$  составляет 20 мкм, распределение  $E(x)$  в каустике пучка имеет вид:  $E(x) = E_0 \cdot \exp[-(x/s)^2]$ ,  $s = 0,017$  мм.

Лазерный импульс накачки распространяется в ячейке с изотопически чистым рубидием  $^{87}\text{Rb}$ . Концентрация атомов Rb составляет  $N_0 = 2,72 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

В эксперименте генерация Оп-импульсов происходила на малом расстоянии нелинейного взаимодействия со средой – 0.1...1 мм.

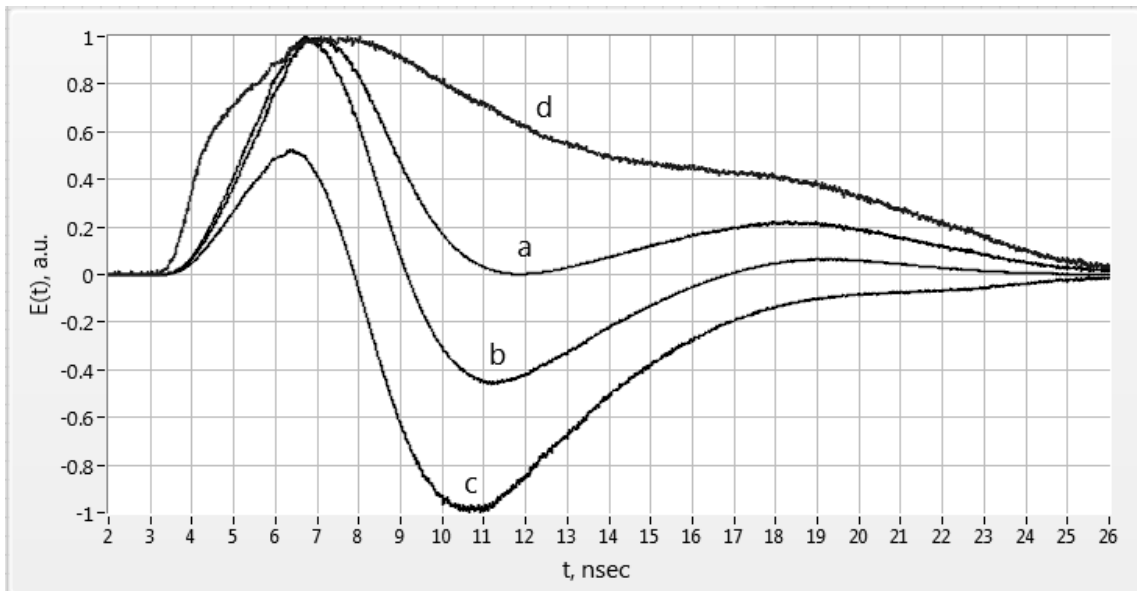
Излучение, выходящее из ячейки под различными углами дифракции  $\varphi$ , фокусируется коллиматором в одномодовый световод диаметром 10 мкм и затем направляется в Single Photon Avalanche Diode (SPAD).

Импульсы от одиночных фотонов, сформированные SPAD, поступают в многоканальный временной анализатор, который формирует временную гистограмму зарегистрированных фотонов – число фотонов на временной канал. Число каналов – 4096. Временное разрешение всей системы регистрации определяется временным разрешением применённого SPAD и составляет 27 пс.

## 2. Полученные результаты

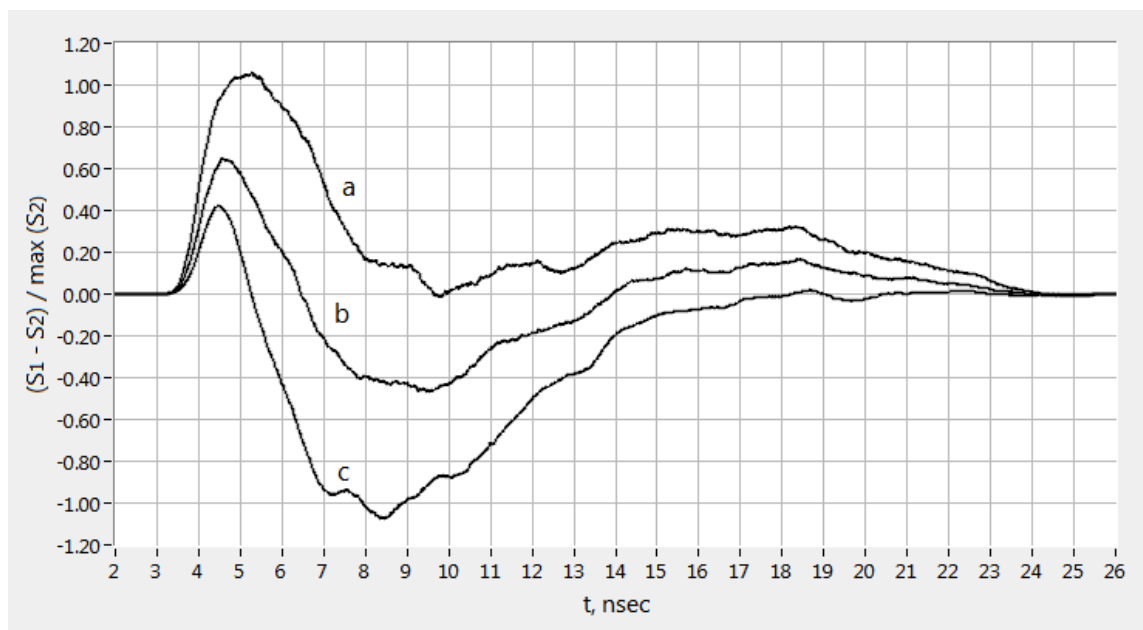
После обработки временных гистограмм зарегистрированных фотонов можно получить форму импульса  $E_p(t)$  и площадь импульса излучения резонансной поляризации среды в форме сигнала  $S_1(t) - S_2(t) \approx 2 \cdot E_{in}(t) \cdot E_p(t)$  [3]. Важно отметить, что применённый метод обработки экспериментальных сигналов позволяет выделить поле излучения поляризации среды  $E_p(t)$  с учётом её знака.

Нами также были выполнены вычисления по моделированию работы прототипа Раби-шейпера. Для этого численно решались полуклассические уравнения Максвелла–Блоха для модели резонансной двухуровневой среды с переходом с однородным типом уширения и заданным пространственным профилем поля накачки  $E_{in}(t, x) = E_{in}(t) \cdot G(x)$ .



- (a) угол дифракции  $\varphi = 0.78^\circ$  (импульс с положительной площадью)
- (b)  $\varphi = 1.82^\circ$  (0л-импульс)
- (c)  $\varphi = 2.86^\circ$  (импульс с отрицательной площадью)
- (d) реалистическая форма импульса  $E_{in}(t)$ ,  $E_{in}(t) \sim (N_{ph}/channel)^{1/2}$

**Рис. 1.** Вычисленная нормированная величина  $2E_{in}(t) \cdot E_p(t)$ .



- (a) угол дифракции  $\varphi = 0.78^\circ$  (импульс с положительной площадью); (b)  $\varphi = 1.82^\circ$  (0л-импульс)
- (c)  $\varphi = 2.86^\circ$  (импульс с отрицательной площадью)

**Рис. 2.** Измеренная величина  $2 \cdot E_{in}(t) \cdot E_p(t)$

На рисунках 1 и 2 приведены примеры результатов численного расчета для реалистичной формы импульса резонансной накачки  $E_{in}(t) \sim (N_{ph}/channel)^{1/2}$  и соответствующие результаты экспериментального наблюдения нелинейной трансформации формы выходных импульсов для различных углов самодифракции  $\varphi$  в резонансной среде паров  $^{87}\text{Rb}$ .

Есть основания полагать, что существует хорошее качественное соответствие между расчётными и экспериментальными данными.

## Заключение

Таким образом, показано, что нелинейный когерентный Раби–шейпер обладает следующими степенями свободы для управления временным профилем и площадью классических и однофотонных волновых пакетов в широких пределах:

- амплитуда импульса накачки, его пространственный профиль  $E_{in}(x)$ ;
- временной (амплитудно–фазовый) профиль импульсов накачки  $E_{in}(t)$ ;
- угол дифракции  $\varphi$ .

Нелинейная генерация  $0\pi$ –импульсов в предложенном методе происходит на малом расстоянии (0.1...1 мм) нелинейного взаимодействия импульса накачки  $E_{in}(t)$  с резонансной средой.

## Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17–19–01097.

## Список источников

- [1] **Sarantos, C. H.** Solid-state ultrafast all-optical streak camera enabling high-dynamic-range picosecond recording / C. H. Sarantos, J. E. Heebner // *Opt. Lett.* — 2010. — Vol. 35. — № 9. — P. 1389-1391.
- [2] **Arkhipov, R. M.** The new ultra high-speed all-optical coherent streak-camera / R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, V. S Egorov, I. A. Chekhonin, M. A. Chekhonin, S. N. Bagayev // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 643. — P. 012029.
- [3] **Bagayev, S. N.** Experimental new ultra-high-speed all-optical coherent streak-camera / S. N. Bagayev, V. A. Averchenko, I. A. Chekhonin, M. A. Chekhonin, I. M. Balmaev, I. B. Mekhov // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2020. — Vol. 1695. — P. 012129.
- [4] **Dudovich, N.** Coherent transient enhancement of optically induced resonant transitions / N. Dudovich, D. Oron, Y. Silberberg // *Phys. Rev. Lett.* — 2002. — Vol. 88. — № 12. — P. 123004-1.
- [5] **Monmayrant, A.** A newcomer’s guide to ultrashort pulse shaping and characterization / A. Monmayrant, S. Weber, B. Chatel // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* — 2010. — Vol. 43. — P. 103001.
- [6] **Crisp, M. D.** Propagation of small-area pulses of coherent light through a resonant medium / M. D. Crisp // *Phys. Rev. A.* — 1970. — V. 1. — № 6. — P. 1604-1611.
- [7] **Rothenberg, J. E.** Observation of the formation of the  $0\pi$  pulse / J. E. Rothenberg, D. Grischkowsky, A. C. Balant // *Phys. Rev. Lett.* — 1984. — Vol. 53. — № 6. — P. 552-555.
- [8] **Costanzo, L. S.** Zero-area single-photon pulses / L. S. Costanzo, A. S. Coelho, D. Pellegrino et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — Vol. 116. — P. 023602.
- [9] **Specht, H.** Phase shaping of single-photon wave packets / H. Specht, J. Bochmann, M. Mücke et al. // *Nature Photon.* — 2009. — Vol. 3. — P. 469–472.

# Simultaneous generation of $N$ coherent pulses of various areas under the self-diffraction in $^{87}\text{Rb}$ vapours

*S. N. Bagayev<sup>2</sup>, I. B. Mekhov<sup>1</sup>, I. A. Chekhonin<sup>1</sup>, M. A. Chekhonin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Institute of Laser Physics, Novosibirsk, Russia

The goal of this work is the development of prototypes of a new element basis of resonant quantum microwave photonics for laser signal processing in the super high frequency range (microwave range). We study experimentally a process of simultaneous radiation of  $N$  coherent resonant pulses of various areas ( $-3\pi \dots 0 \dots 3\pi$ ) from the short caustics (0.1 ... 1 mm) of the resonant laser pump pulse. During the self-diffraction of the pump pulse, the number of radiating signal pulses of various areas reached the value of  $N = 16$ . The pulses were separated by the propagation angle in the range of  $[-5^\circ \dots +4^\circ]$ . In our experiments, we have shown that the effect of resonant self-diffraction of a short pulse can be used as method for pulse area shaping. The pump pulse has a converging cylindrical wave front in  $^{87}\text{Rb}$  vapours (the  $D_2$  resonant transition of the 780.24 nm wavelength). The pulse laser power did not exceed 8.5 mW at the pulse duration of 4–5 ns, the temporal resolution of the system was 27 ps. The recording system enabled registering not only the temporal profile of the field  $E_p(t)$  radiated by the matter polarisation, but the sign of this field as well. In the caustics of the pump laser pulse  $E(t,x) = E(t) \cdot f(x)$ , the spatial profile of the field had a Gaussian form  $f(x) = \exp[-(x/s)^2]$ ,  $s = 0.017$  mm. We discuss the efficiency of application of the developed computer-generated holograms (CGH) for creating an arbitrary spatial profile of the pump pulse  $f(x)$ . The nonlinear process of the  $0\pi$ -pulse generation of a non-zero energy corresponds to the case of a pulse with zero area. We underline that we suggested for the first time such a method to generate  $0\pi$ -pulses at a short propagation distance.

*Keywords:* Self-diffraction, Pulse area, Quantum microwave photonics, Computer-generated hologram.

# Формирование векторных вихрей с использованием уголковых отражателей с фазосдвигающим покрытием

*В. Ю. Венедиктов<sup>1</sup>, К.Н. Гаврильева<sup>1</sup>, Ю.С.Гудин<sup>1</sup>, В.Д.Ненадович<sup>2</sup>, А.А.Рыжая<sup>1</sup>,  
А.А. Севрюгин<sup>1</sup>, А. Л. Соколов<sup>2</sup>, Е.В. Шалымов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-производственная корпорация «Прецизионные системы и приборы» (НПЦ ПСИ),  
Москва, Россия

В данной статье описывается экспериментальное исследование способа формирования оптического вихря с использованием лучей, отраженных от комбинации двух уголковых отражателей со специальным интерференционным фазосдвигающим покрытием. Как предсказывалось ранее, при правильном расположении эти уголковые отражатели создают пространственную поляризационную структуру, которую можно назвать оптическим вихрем, поскольку плоскость колебаний вектора  $E$  вращается с изменением азимута в поперечной плоскости. Это позволяет легко создавать такие вихри, хотя и с некоторыми трудностями из-за необходимости точного управления оптическим путем, а сами вихри создаются в дальней зоне.

*Ключевые слова:* Оптический вихрь, Уголковые отражатели, Пространственная поляризационная структура, Поляризация света, Световозвращающий пространственно-поляризационный интерферометр.

*Цитирование:* **Венедиктов, В. Ю.** Формирование векторных вихрей с использованием уголковых отражателей с фазосдвигающим покрытием / В. Ю. Венедиктов, К. Н. Гаврильева, Ю. С. Гудин, В. Д. Ненадович, А. А. Рыжая, А. А. Севрюгин, А. Л. Соколов, Е. В. Шалымов // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 52–55.

## Введение

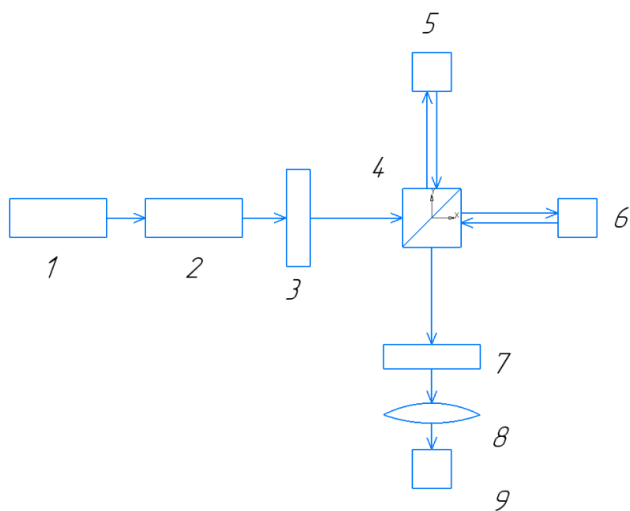
Оптические вихри имеют множество различных потенциальных применений - связь, оптические испытания, оптическое управление мелкими частицами и т.д. Существует несколько методов создания оптических вихрей, такие как компьютерные голограммы, спиральные фазовые пластины, преобразование мод и так далее. Однако приветствуются новые методы создания оптических вихрей, расширяющие область их применения.

Ранее была проделана большая работа по созданию уголковых отражателей с определенным дифракционным распределением в дальней зоне, причем одним из эффективных способов его оптимизации было использование специального фазосдвигающего интерференционного покрытия для создания необходимого фазового сдвига света, отражающегося от граней отражателя. [1-6] Такие отражатели образуют дифракционную картину с шестью лепестками, в которой каждое пятно имеет плоскости колебаний вектора  $E$ , повернутые друг относительно друга на определенный угол. В [7] показано, что комбинация двух УО со специальным покрытием с углом между ними 90 градусов создает поляризационно-симметричную структуру отраженного излучения, а в случае падающего света с круговой поляризацией - оптический вихрь второго порядка [8].

Наконец, в [9] была рассмотрена интерференция лучей и сделан вывод, что суперпозиция двух развернутых отражателей позволяет получить устройство, подобное вращателю спиральной поляризации положительного второго порядка, которое при отражении образует левый оптический вихрь в случае света с правой круговой поляризацией или меняет свой порядок (заряд). Однако большинство этих исследований были теоретическими, поэтому мы решили начать с простого эксперимента, чтобы создать распределение интенсивности в форме пончика с использованием отражателей углами из линейно поляризованного света, в результате чего плоскость поляризации вращалась бы вокруг центра.

### Экспериментальная установка и результаты

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1, где в качестве источника используется гелий-неоновый лазер 1. С помощью настраиваемого коллиматора 2 можно получить либо параллельный, либо слегка расходящийся пучок света. Коллимированный пучок проходит через поляризатор 3, после чего разделяется неполяризующим светоделителем 4 на две волны с одинаковой интенсивностью и поляризацией. После этого лучи отражаются призмами 5 и 6 и снова объединяются светоделительным кубом, создавая необходимое распределение поляризации. Затем луч несколько раз отражался от простых зеркал, установленных на определенных расстояниях (на схеме не показаны) для увеличения оптического пути. После этого результат записывали с помощью цифровой камеры или наблюдали невооруженным глазом на экране 9. Путем поворота поляризатора 8 было проанализировано распределение поляризации на окончательном снимке.

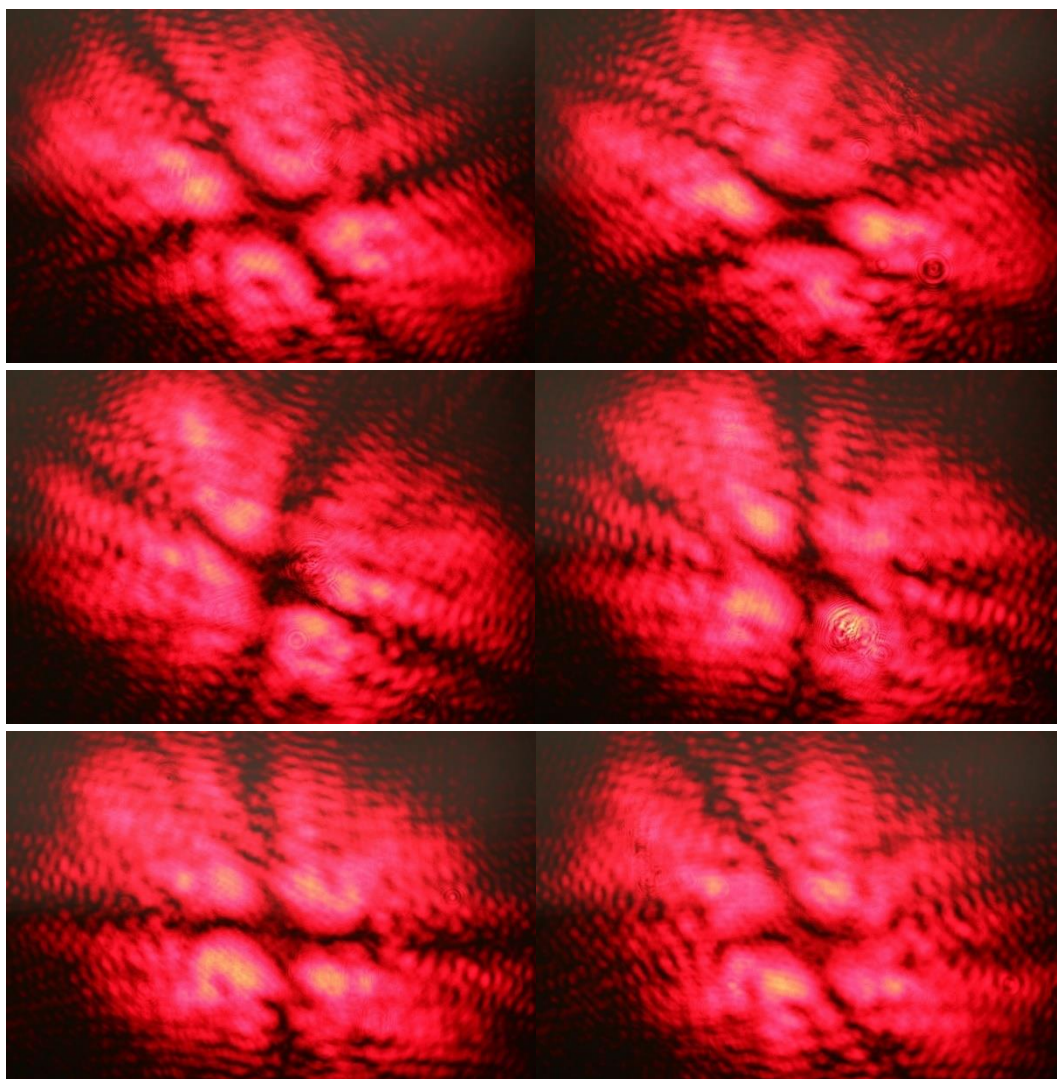


1 — He-Ne лазер; 2 — коллиматор; 3,7 — линейные поляризаторы; 4 — светоделительный куб;  
5, 6 — уголкового отражатели; 8 — линза; 9 — камера / экран

**Рис. 1.** Экспериментальная установка

На рисунке 2 показаны изображения, полученные под разными углами поляризатора 8. Из-за недостаточного расстояния между экспериментальной установкой и камерой эти изображения не выглядят так, как должны (с распределением интенсивности в форме

пончика), поскольку эффекты дифракции в дальней зоне недостаточно сильно повлияли на распределение интенсивности. Однако отчетливо видно, что распределение интенсивности изменяется при повороте поляризатора в соответствии с ожиданиями.



**Рис. 2.** Результаты, полученные при вращении поляризатора  $\delta$ .

### **Заключение**

В данной работе представлено экспериментальное исследование формирования поляризационно-симметричной структуры отраженного излучения с использованием лучей, отраженных от системы двух уголковых отражателей со специальным интерференционным фазосдвигающим покрытием. Основываясь на предыдущих теоретических исследованиях, создан простой световозвращающий интерферометр с пространственной поляризацией для получения кольцевидного распределения интенсивности из линейно поляризованного света с результирующей плоскостью поляризации, вращающейся вокруг центра. Результаты показывают, что поляризация полученного изображения соответствует теоретическим исследованиям. В ближайшем будущем планируется продолжить этот эксперимент с увеличением оптического пути, чтобы получить достаточное влияние дифракции на изображение, и провести эксперимент с круговой поляризацией на входе.

## Благодарность

Исследование финансировалось Правительством Российской Федерации в рамках Программы «Приоритет-2030». К. Н. Гаврильева выражает благодарность РФФИ за финансирование в рамках гранта 20-32-90140 Аспиранты.

## Список источников

- [1] Sadovnikov M. A., Sokolov A. L. Spatial polarization structure of radiation formed by a retroreflector with nonmetallized faces // Optics and spectroscopy. – 2009. – Т. 107. – №. 2. – С. 201-206.
- [2] Crabtree K., Chipman R. Polarization conversion cube-corner retroreflector // Applied optics. – 2010. – Т. 49. – №. 30. – С. 5882-5890.
- [3] Sokolov A. L., Murashkin V. V. Diffraction polarization optical elements with radial symmetry // Optics and spectroscopy. – 2011. – Т. 111. – №. 6. – С. 859-865.
- [4] Sokolov A. L. Formation of polarization-symmetrical beams using cube-corner reflectors // JOSA A. – 2013. – Т. 30. – №. 7. – С. 1350-1357.
- [5] Sokolov A. L. Optical vortices with axisymmetric polarization structure // Optical Engineering. – 2017. – Т. 56. – №. 1. – С. 014109.
- [6] Dennis M. R., O'holleran K., Padgett M. J. Singular optics: optical vortices and polarization singularities // Progress in optics. – Elsevier, 2009. – Т. 53. – С. 293-363.
- [7] Sokolov A. L. Formation of polarization-symmetrical beams using cube-corner reflectors // JOSA A. – 2013. – Т. 30. – №. 7. – С. 1350-1357.
- [8] Sokolov A. L. Optical vortices with axisymmetric polarization structure // Optical Engineering. – 2017. – Т. 56. – №. 1. – С. 014109.
- [9] Sokolov A. L., Murashkin V. V. Retroreflective spatial-polarization interferometer // Applied Optics. – 2020. – Т. 59. – №. 32. – С. 9912-9923.

## Formation of vector vortices using corner reflectors with a phase-shifting coating

*V. Y. Venediktov<sup>1</sup>, K. N. Gavriljeva<sup>1</sup>, Y. S. Gudin<sup>1</sup>, V. D. Nenadovich<sup>2</sup>, A. A. Ryzhaya<sup>1</sup>,  
A. A. Sevryugin<sup>1</sup>, A. L. Sokolov<sup>2</sup>, E. V. Shalymov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> St.-Petersburg state electrotechnical university LETI, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Research-and-production corporation «Precision system and Instruments», Moscow, Russia

This article describes an experimental study of the method of forming an optical vortex using rays reflected from a combination of two corner reflectors with a special interference phase-shifting coating. As predicted earlier, when properly positioned, these corner reflectors create a spatial polarization structure that can be called an optical vortex, since the plane of oscillation of the vector  $E$  rotates with a change in azimuth in the transverse plane. This makes it easy to create such vortices, albeit with some difficulty due to the need for precise control of the optical path, and the vortices themselves are created in the far field.

*Keywords:* Polarization interferometer, Singular optics, Optical vortex.



# Проектирование преобразователя лазерного излучения типа Focal-piShaper методом геометрического картирования

Я. В. Терло, А. О. Вознесенская

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе демонстрируется метод моделирования преобразователя лазерного излучения типа *Focal-piShaper* на основе геометрического картирования лучей. Разработанный алгоритм позволяет одновременно моделировать две поверхности свободной формы с осевой симметрией, обеспечивающих геометрическое преобразование профиля лазерного одномодового пучка ( $TEM_{00}$ ) в профиль вида «Диск Эйри» («Картина Эйри»), с высокой точностью. Результаты проверяются путем моделирования прибора в *Zemax OpticStudio*.

*Ключевые слова:* Оптика, Лазер, Преобразователь, Интенсивность, Поверхности свободной формы, Геометрическое картирование.

*Цитирование:* Терло, Я. В. Проектирование преобразователя лазерного излучения типа Focal-piShaper методом геометрического картирования / Я. В. Терло, А. О. Вознесенская // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 56–61.

## Введение

Производительность многих современных научных и промышленных лазерных приложений увеличивается за счет применения оптики формирования луча, которая используется для создания различных профилей интенсивности излучения. Выбор оптимальной формы пятна и профиля интенсивности лазерного луча зависит от области применения: очень часто требуется получить так называемый профиль с плоской вершиной (*Flat-Top*). На сегодняшний день в мире активно распространяются так называемые *Focal-piShapers*, приборы, позволяющие с большой точностью преобразовывать Гауссово распределение интенсивности в одномодовом пучке  $TEM_{00}$  после фокусировки объективом в профиль *Flat-top* высокой интенсивности и малого диаметра [1–3].

### 1. Поиск аналитических профилей распределения интенсивности

Для канонической координаты  $\eta$  интенсивность рассчитывается через уравнение плотности нормального распределения:

$$f(2\pi\eta) = K \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{(2\pi\eta-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (1)$$

где  $\sigma = 1,3523$  – среднеквадратическое отклонение от среднего, высчитывается аналитически из условия равенства интегральной плотности распределений Гауссова пучка и «картины Эйри»;  $\mu = 0$  – математическое ожидание (поскольку пучок осесимметричен и не децентрирован);  $K = 3,389684$  – масштабный коэффициент.

Для «картины Эйри» интенсивность высчитывается с помощью функции Бесселя первого порядка первого рода, представимую в виде ряда Тейлора около нуля:

$$J_1(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m+2)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+1}, \quad (2)$$

где  $\Gamma(m+2) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{m+1} dx$  – гамма-функция Эйлера.

Распределение «картина Эйри» описывается математически формулой:

$$I(\eta) = I_0 \cdot \left(\frac{J_1(2\pi\eta)}{\pi\eta}\right)^2, \quad (3)$$

где  $I$  – интенсивность,  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка первого рода,  $\eta$  – каноническая координата,  $I_0 = 0,59$  – константа.

Таким образом, используя формулы (1) и (3), можно для любой координаты  $x$  определить интенсивность лазерного пучка на входе и выходе из преобразователя. Далее решается обратная задача по расчету распределения лучей в профиле пучка относительно его интегральной плотности.

Шаг по плотности интенсивности в полупрофиле неравномерен: первые 250 лучей вычисляются с шагом в 0,0038 отн.ед., а следующие 250 – с шагом в 0,0002 отн.ед. Подобное решение позволяет получить больше точек для областей «колец Эйри», повышая точность моделирования поверхности – таким образом, на моделирование первого, второго, третьего и четвертого колец диска Эйри приходится столько же точек, сколько и на «ядро».

Из технологических соображений сохранение более двух колец Эйри не требуется, поэтому последний трассируемый луч будет приходить в конец второго кольца. Итого, выборка будет содержать 1001 луч (два одинаковых, ввиду осесимметричности системы, набора по 500 лучей и одного осевого луча).

Так как нормированные профили несколько не соотносятся по размерам (10 кан.ед. у Гаусса против 24 кан.ед. у «картины Эйри»), было решено расширить диапазон для Гаусса в два раза, до 20 кан.ед. Это также является одним из условий при конструировании преобразователя лазерного излучения – близкое к единице увеличение в зрачках. Итоговые аналитические профили пучков (в пересчете на реальные единицы измерения, мм) представлены на рисунке 1.

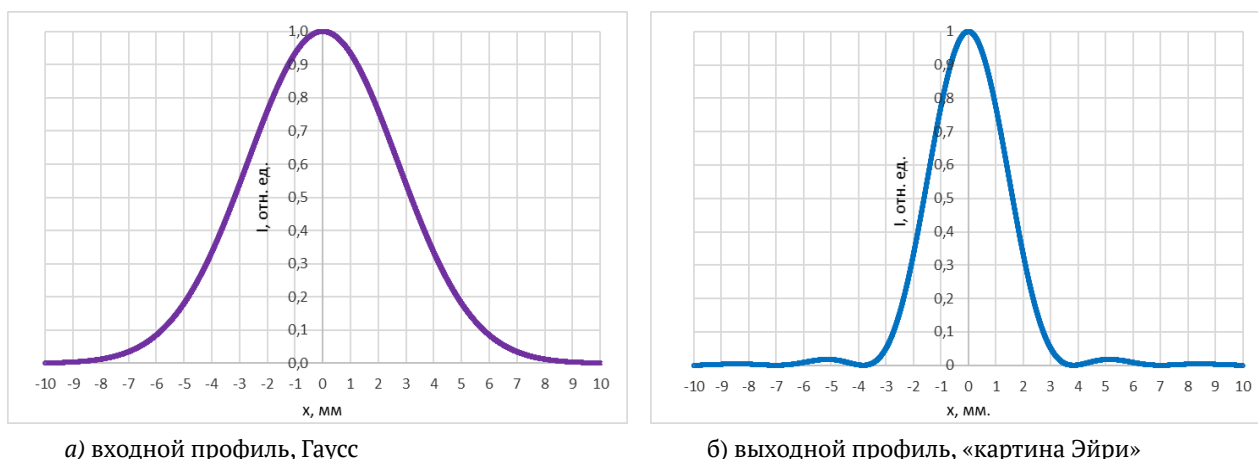
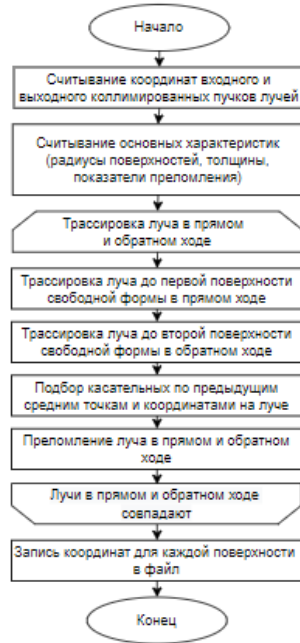


Рис. 1. Общий вид профилей распределения интенсивности

## 2. Расчет поверхностей свободной формы преобразователя типа Focal-πShaper

Алгоритм расчета поверхностей свободной формы при подаче на вход Гауссова пучка и введении условия о сферической форме входной/выходной граней преобразователя представлен на рисунке 2. Он основан на принципе геометрического картирования (ray mapping), подробно описанный в работе [4].



**Рис. 2.** Общий вид алгоритма расчета поверхностей свободной формы с осевой симметрией

После трассировки луча до первой поверхности свободной формы в прямом ходе, для предыдущей средней точки  $(z_1, y_1)$  ищется такая точка  $(Z_1, Y_1)$ , чтобы в ней после преломления от поверхности, выраженной уравнением касательной с коэффициентами

$$k_1 = \frac{Y_1 - y_1}{Z_1 - z_1}, \quad (4)$$

$$b_1 = y_1 - kz_1, \quad (5)$$

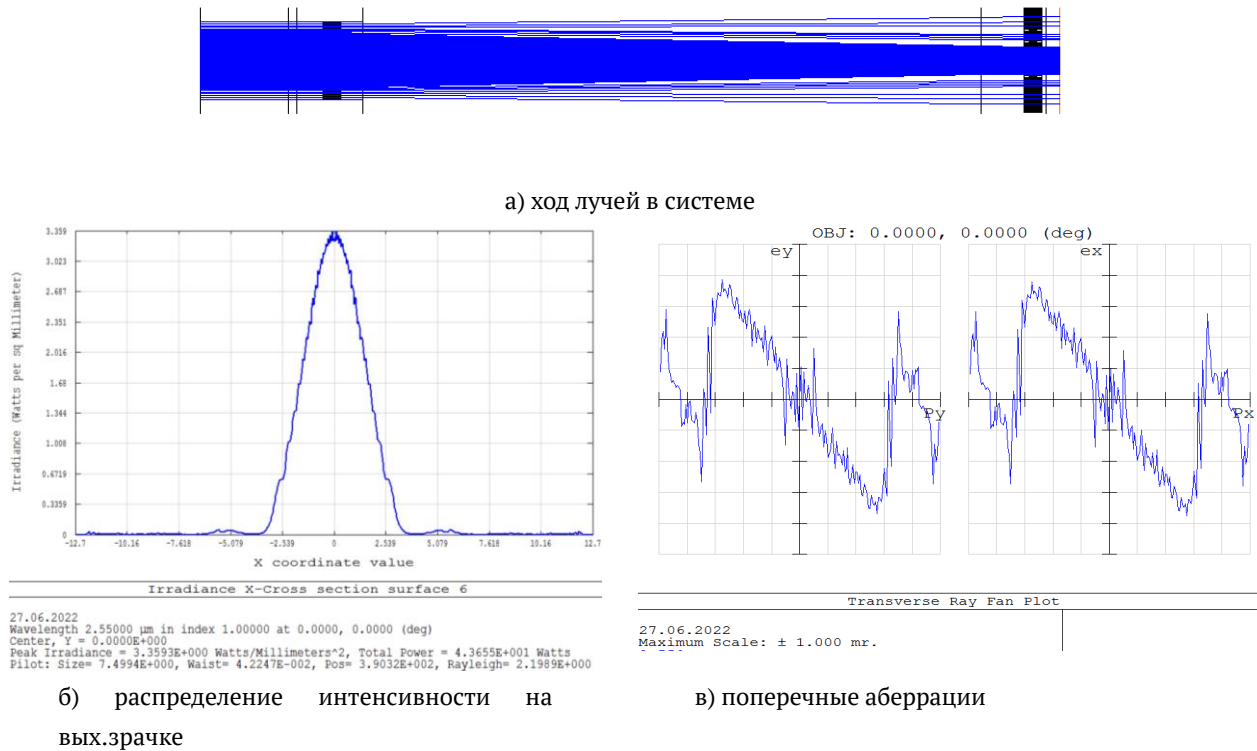
найти коэффициенты луча  $k$  и  $b$ . Соответственно, после этого ищется пересечение с лучом в обратном ходе на второй поверхности свободной формы.

Одновременно для второй поверхности находится точка  $(Z_2, Y_2)$  через известную среднюю точку  $(z_2, y_2)$  и коэффициент  $k_1$  (т.к. должно выполняться условие коллимированности пучков, входная и выходные грани плоские, а показатели преломления материалов одинаковы). Если полученная координата  $Z_2$  больше, чем координата точки пересечения преломленного луча, то  $Z_1$  уменьшается, в противном случае – увеличивается.

Повторяя итерационно этот процесс можно добиться совпадения точек и, следовательно, выполнить условие трассирования луча в прямом и обратном ходе. После чего ищутся следующие пары средних точек через известные координаты  $(Z_2, Y_2)$ ,  $(Z_2, Y_2)$  и коэффициент  $k_1$ , и процесс повторяется для нового набора высот  $Y$ .

### 3. Моделирование преобразователя и добавление к нему фокусирующей линзы

Оба компонента преобразователя моделируются с помощью программного обеспечения для CAD-моделирования *SolidWorks*. После чего обе модели в формате *STEP*-файлов подгружаются в *Zemax* как *Non-Sequential Components*. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.



**Рис. 3.** Результат моделирования преобразователя

Чтобы оценить погрешность воспроизведения преобразования, необходимо рассчитать СКО разности, нормированной к единице интенсивности, полученной в результате моделирования, и теоретической интенсивности для «картины Эйри». Расчет СКО производится по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (\Delta I_i - \bar{\Delta I})^2}{n - 1}}, \quad (6)$$

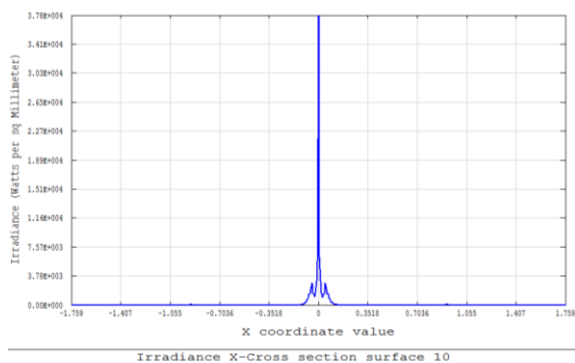
где  $\Delta I_i$  – разность нормированных интенсивностей аналитически рассчитанной и смоделированной для луча  $i$ ,  $n$  – общее количество лучей (в данном случае 512).

С учетом того, что профиль в виде «картины Эйри» отнормирован таким образом, чтобы интеграл от него давал 2 Вт/мм<sup>2</sup>, его СКО  $\sigma = 0,018$  Вт/мм<sup>2</sup>, что составляет меньше 1%. Это, как и малые величины поперечной aberrации позволяет говорить о высоком качестве полученной системы и функциональности разработанного алгоритма.

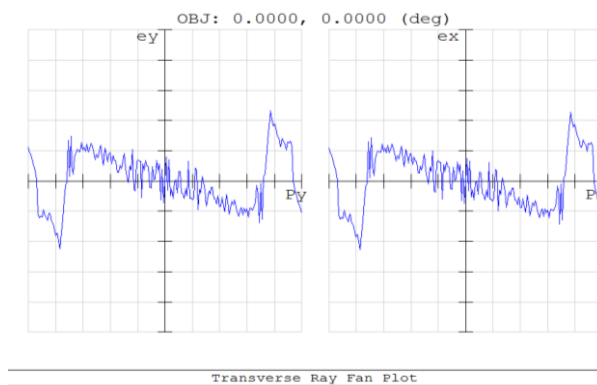
*Focal-πShaper* работает в паре с фокусирующим объективом [2]. Для завершения моделирования добавляется линза из селенида цинка с фокусным расстоянием  $f = 50$  мм. Финальная схема представлена на рисунке 4.



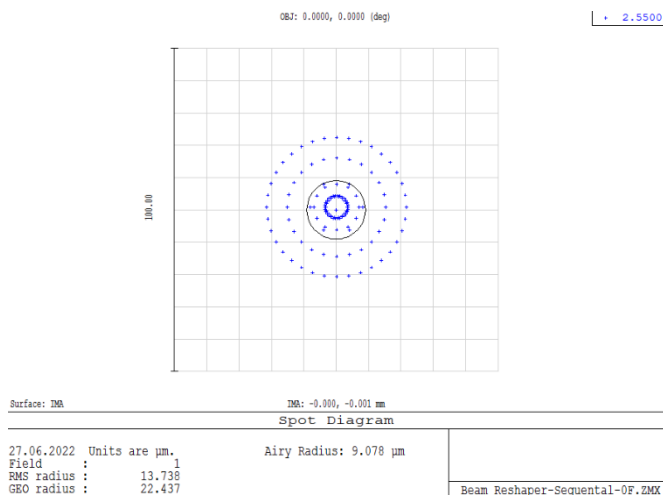
а) ход лучей в системе



б) интенсивность в области фокуса объектива



в) поперечные aberrации



г) пятно рассеяния

**Рис. 4.** Результат моделирования преобразователя

Боковые всплески за пределами диска Эйри вызваны остаточными aberrациями в системе. Заметно, как сильно возросла интенсивность в пике пучка после фокусировки, а aberrации равномерны по всему зрачку, что подтверждает теорию, связанную с особенностями шейперов данного типа [1–3].

### Заключение

В работе представлен метод проектирования преобразователя лазерного излучения типа *Focal-πShaper* на основе метода геометрического картирования лучей через

одновременно моделируемые пару поверхностей свободной формы с осевой симметрией. Анализ аберрационных свойств и результирующего профиля распределения интенсивности подтверждает высокую точность метода синтеза преобразователя и сходится с основными теоретическими положениями с точностью до остаточных погрешностей моделирования элементов преобразователя.

### **Благодарности**

Работа поддержана грантом НИР МА ФТ МФ Университета ИТМО.

### **Список источников**

- [1] Laskin A., Laskin V. Variable beam shaping with using the same field mapping refractive beam shaper //Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV. – SPIE, 2012. – Т. 8236. – С. 81-90.
- [2] Ласкин А. В. и др. Формирователи профиля интенсивности лазерных пучков //Фотоника. – 2018. – Т. 12. – №. 2. – С. 178-190.
- [3] Laskin A., Laskin V., Ostrun A. Refractive beam shapers for optical systems of lasers //Components and Packaging for Laser Systems. – SPIE, 2015. – Т. 9346. – С. 162-171.
- [4] Bruneton A. et al. Limitations of the ray mapping approach in freeform optics design //Optics letters. – 2013. – Т. 38. – №. 11. – С. 1945-1947.

## **Designing laser beam intensity profile shaper (Focal-piShaper) using ray mapping**

*Y. V. Terlo, A. O. Voznesenskaya*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The work demonstrates a method for modeling a laser beam intensity profile shaper (Focal-piShaper) based on ray mapping. The developed algorithm makes it possible to simultaneously calculating two freeform surfaces with axial symmetry, which provide a geometric transformation of the profile of single-mode laser beam (TEM<sub>00</sub>) into an «Airy disk» ("Airy pattern") profile with high accuracy. The results are verified by modeling shaper in Zemax OpticStudio.

*Keywords:* Optics, Laser, Shaper, Intensity, Freeform surfaces, Ray mapping.

# Нарушается ли устойчивость структурированного вихревого пучка при ведении информации в его степени свободы?

А. Воляр<sup>1</sup>, Е. Абрамочкин<sup>2</sup>, М. Брецько<sup>1</sup>, Я. Акимова<sup>1</sup>, Ю. Егоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> КФУ им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт, Симферополь, Россия

<sup>2</sup> Самарский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия

Проведено сравнение структурной устойчивости двух семейств структурированных пучков, подверженных внутренним возмущениям: структурированного пучка Лагерра-Гаусса (sLG) и структурированного спирального вихревого пучка (sSV). Показано, что при отсутствии регулярного возбуждения, случайные возмущения радикально изменяют контур каустической поверхности, что приводит к нарушению условий согласования в составе невозмущенного SV пучка. Показано, что изменение фазового параметра не влияет на процесс структурной устойчивости двух семейств структурированных пучков.

*Ключевые слова:* Структурная устойчивость, Спиральный пучок, Спектр вихрей.

*Цитирование:* Воляр, А. Нарушается ли устойчивость структурированного вихревого пучка при ведении информации в его степени свободы? / А. Воляр, Е. Абрамочкин, М. Брецько, Я. Акимова, Ю. Егоров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. —Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 62–67.

## Введение

Важным свойством структурированных пучков [1] является их устойчивость к слабым возмущениям. По своей физической природе структурированный вихревой пучок имеет множество степеней свободы (циркулярная или линейная поляризация, орбитальный угловой момент (ОУМ), структура собственных мод и т.д.) [2], которые проявляются в зависимости от метода детектирования переносимой информации. Как правило, моды структурированного пучка жестко связаны по амплитудам, фазам, поляризациям, что не позволяет пучку разрушиться при распространении. Однако, структурной устойчивости [3] такой комбинации мод угрожает не только внешние возмущения, встречающиеся на пути пучка, но и ввод информации в каждую его моду, которые мы будем называть внутренними возмущениями пучка. По нашим данным этот вопрос еще не затрагивался в литературе. Поэму в данном сообщении мы сравним структурную устойчивость двух семейств структурированных пучков, подверженных внутренним возмущениям: структурированного пучка Лагерра-Гаусса (sLG) и структурированного спирального вихревого пучка (sSV).

## Устойчивость структурированного вихревого пучка

Структурированный sLG пучок представляет собой комбинацию мод Эрмита-Гаусса (HG) [4]

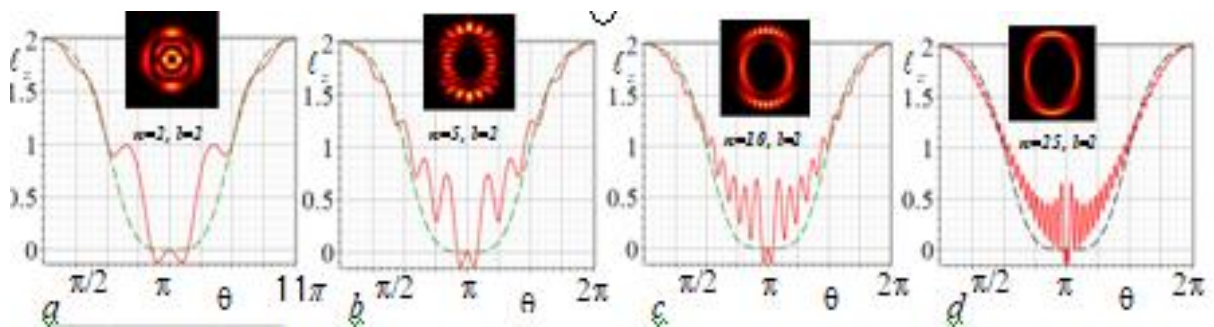
$$sLG_{n,\ell}(\mathbf{r} | \varepsilon, \theta) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \sum_{k=0}^{2n+\ell} (-i)^k (-2)^k P_k^{(n+\ell-k, n-k)}(0) \varepsilon_k(\varepsilon, \theta) HG_{2n+\ell-k, k}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{r} = (x, y)$ ,  $P_k^{(n,m)}$  – многочлены Якоби, которая сворачивается к стандартному LG пучку в отсутствии возмущения:  $\varepsilon_k (\varepsilon = 0, \theta = 0) = 1$ . Ввод информации в каждую HG моды sLG пучка сопровождается изменением их амплитуды  $\varepsilon$  и фазы  $\theta$ , что и вызывает внутреннее возмущение. С другой стороны, структурированный спиральный пучок, скажем, треугольной формы [3,5]

$$sSV = \sum_{m=0}^{\infty} C_m sLG_{0,m}(\mathbf{r}, z, \varepsilon, \theta) \quad (2)$$

представляет собой бесконечную суперпозицию sLG пучков, подверженную 2-параметрическому возмущению  $\varepsilon_k$  каждой HG моды в исходной плоскости  $z=0$ .

Когда в каждую HG моды sLG пучка водится амплитудное и фазовое возмущение, структура пучка резко изменяется. Пучок переходит в новое структурно устойчивое состояние. Его структурная устойчивость при распространении определяется тем фактом, что фаза Гун в составе всех HG мод остается неизменной и равной  $\Gamma_{n,l} = (2n + l + 1) \arctan(z/z_0)$ . В тоже время, ОУМ пучка начинает осциллировать при изменении фазового параметра  $\theta$ . При чем осцилляции исчезают, если “выключить” ( $n=0$ ) радиальное число, как иллюстрируют пунктирные кривые на Рис. 1. В тоже время, частота осцилляций быстро нарастает по мере увеличения радиального числа.



**Рис. 1.** ОУМ  $l_z(\theta)$  пучка  $sLG_{n,l}$  с различными азимутальными  $l$  и радиальными  $n$  числами для амплитудного параметра  $\varepsilon = 1$ , когда фазовый параметр  $\theta$  изменяется в интервале  $\theta \in (0, 2\pi)$ . Пунктирные кривые соответствуют нулевому радиальному числу  $n=0$ . На выносках представлены картины интенсивности  $\Im(x, y)$  при соответствующих  $n$  и  $l$ , но  $\theta = \pi/3$ .

Важно заметить, что сохранение структурной устойчивости sLG пучка несет в себе характерную меру, заключающуюся в сохранении общего топологического заряда (ТЗ) пучка при различных вариациях амплитудных и фазовых параметров. По определению [6] общий ТЗ структурированного пучка определяется числом пересечений траекторий оптических вихрей поперечного сечения пучка с учетом их знаков, и численно равен локальному ТЗ моды LG с максимальным квадратом амплитуды в составе пучка. В теоретическом плане необходимо представить комплексную амплитуду (1) в базисе LG мод, как это было сделано в нашей статье [5]

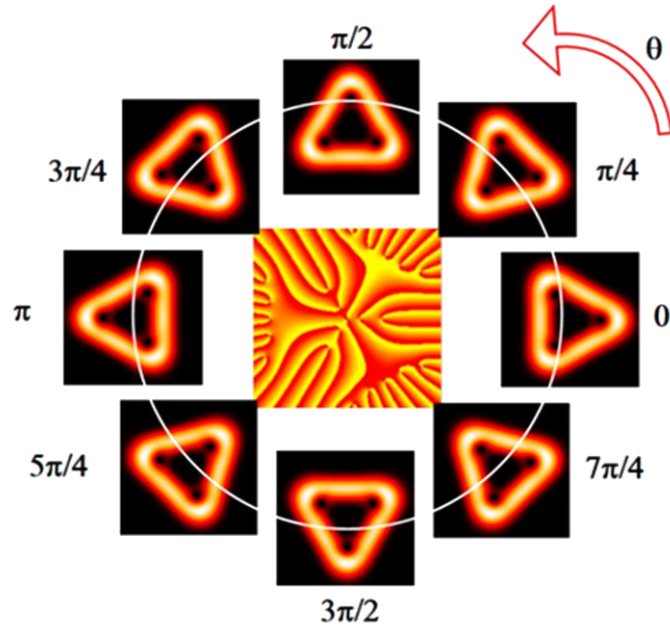


$$sLG_n^{(l)} = \sum_{k=0}^{2n+l} c_k LG_{\min}^{(2n+l-2k)}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

$$c_k = \delta_{n,k} + (-1)^{\min} \varepsilon \frac{i^{n+k} e^{i(2n+l)\theta/2}}{2^{n+l} n!} 2^{\max} \min! \times \\ \times \sin^{n-k} \theta / 2 \cos^{n+l-k} \theta / 2 P_k^{(n-k, n+l-k)}(\cos \theta), \quad (4)$$

где  $\min = \min(2n+l-k, k)$ ,  $\max = \max(2n+l-k, k)$ . Из (3) видим, что максимальным локальным ТЗ соответствуют две LG моды с  $TC^+ = 2n+l$  и  $TC^- = -(2n+l)$ . Далее следует сравнить квадраты амплитуд  $|c_0|^2 \vee |c_{2n+l}|^2$  в (4) между собой. Поскольку числа  $n$  и  $l$  заданы, а число мод  $N = 2n+l+1$  неизменно, то положительные и отрицательные ТЗ также строго определены. Однако, при быстрых осцилляциях ОУМ общий ТЗ может скачком изменяться в интервале фазовых параметров  $\theta \in (\pi/2, 3\pi/2)$ , то инвариантом процесса служит модуль ТЗ при заданных числах  $n$  и  $l$ . В экспериментальном плане, следует измерить спектр LG мод sLG пучка [5], и сравнить квадраты амплитуд мод с максимальными локальными ТЗ. Это условие не изменится, даже если фазовый параметр  $\theta$  будет случайно изменяться в интервале  $\theta \in (-\pi, \pi)$ .

Теперь посмотрим, как откликается sSV пучок (2) на 2-параметрическое внутреннее возмущение. Напомним, что стандартный треугольный SV пучок [3] содержит бесконечно большое число оптических вихрей, но основной вклад в треугольное распределение интенсивности дают только 7 первых вихрей с максимальным ТЗ, равным 22, которые располагаются внутри каустической поверхности [4], но не пересекают ее. Слабое возмущение каустической поверхности (поверхность устойчивости) не изменяет структурной устойчивости (на Рис. 2,  $\theta=0$  ее сечение имеет треугольную форму в виде тонкой яркой линии). Если же возмущение локально разрушает каустическую поверхность, то SV пучок переходит в новое структурно устойчивое состояние. Структурная устойчивость пучка обеспечивается строгим согласованием амплитуд и фаз LG мод, что появляется во вращении каустики вдоль длины пучка.



**Рис. 2.** Вращение каустики sSV пучка в исходной плоскости  $z=0$  при возбуждении каждой LG моды кратными фазами  $m\theta$

Сначала введем кратные фазы  $\varepsilon_m = \exp(im\theta)$  в каждую LG моду комплексной амплитуды (2) в исходной плоскости  $z=0$ . Результат такого возмущения иллюстрирует Рис.2 с экспериментальными картинками интенсивности. Нарастание фазового параметра  $\theta$  происходит против часовой стрелки, в то время как каустика пучка синхронно поворачивается на угол  $\alpha=\theta$  вокруг оси пучка. Структурная устойчивость структурированного пучка сохраняется, поскольку при распространении вдоль оси  $z$  треугольная форма каустики не изменяется, но происходит ее вращение и изменяется масштаб, как и в случае невозмущенного пучка.

Совсем иная ситуация возникает, в случае глубинного возбуждения sSV пучка, когда кратные фазы возбуждаются в каждой HG моде sLG структурированной моды. В отличие от предыдущего случая здесь мы усложнили условия возбуждения sLG мод, используя 4-параметрическое возмущение комплексной амплитуды

$$sSV = \sum_m C_m \sum_{k=0}^m \varepsilon_k HG_k(x, y), \quad (5)$$

$$\varepsilon_k = \{1 + \varepsilon \exp(ik\theta)\} \{1 + a \exp(ib\Delta_k)\}, \quad (6)$$

Первый множитель в фигурных скобках в (6) описывает случай возбуждения кратных фаз, но второй множитель в фигурных скобках характеризует случайный процесс, возникающий в реальном эксперименте, когда случайная фаза может меняться в широком интервале  $\Delta_k \in (-\pi, \pi)$ . Края этого интервала ограничивает параметр  $b$ , а параметр  $a$  регулирует вклад случайных процессов в возбуждение HG мод, где задействованы все скалярные степени свободы sSV пучка. Результат такого возбуждения HG мод иллюстрирует Рис. 3 для случая

$\varepsilon=a=b=1$ . На эксперименте случайное возбуждение моделировалось с помощью генератора случайных чисел.

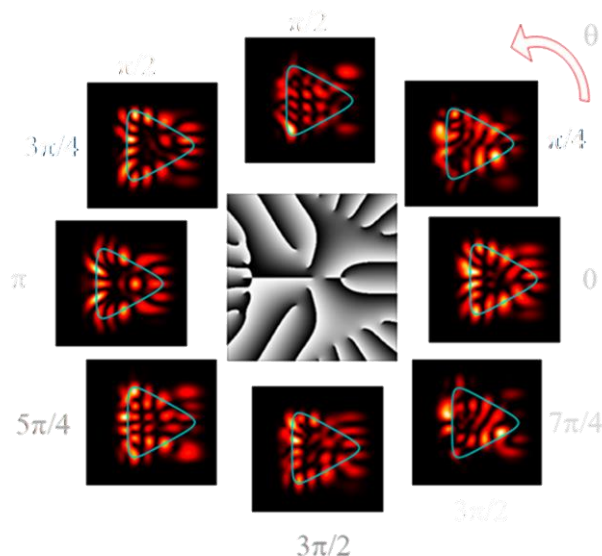


Рис. 3. Разрушение устойчивости sSV пучка при возбуждении кратных фаз в каждой HG моды в составе sLG мод. Тонкая треугольная линия указывает на положение невозмущенной каустики в плоскости  $z=0$

Из Рис. 3 видим, что даже в отсутствии регулярного возбуждения  $\theta=0$ , случайные возмущения  $\Delta_k$  радикально изменяют контур каустики. Это означает, что нарушаются условия согласования LG мод в составе невозмущенного SV пучка. Структурная устойчивость разрушается. Изменение фазового параметра  $\theta$  уже не влияют на процесс разрушения.

### Заключение

Проведено сравнение структурной устойчивости двух семейств структурированных пучков, подверженных внутренним возмущениям: структурированного пучка Лагерра-Гаусса (sLG) и структурированного спирального вихревого пучка (sSV). Показано, что при отсутствии регулярного возбуждения, случайные возмущения радикально изменяют контур каустической поверхности, что приводит к нарушению условий согласования в составе невозмущенного SV пучка. Показано, что изменение фазового параметра не влияет на процесс структурной устойчивости двух семейств структурированных пучков.

### Список источников

- [1] **Forbes, A.** Structured light / A. Forbes, M. de Oliveira, M. R. Dennis // Nature Photonics. — 2021. — Vol. 15. — P. 253–262.
- [2] **Shen, Yi.** Structured ray-wave vector vortex beams in multiple degrees of freedom from a laser / Yi. Shen, Xi. Yang, D. Naidoo, Xing Fu, A. Forbes // Optica. — 2020. — Vol.7. — № 7. — P. 820-831
- [3] **Абрамочкин, Е.Г.** Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников— М.: Физматлит, 2010. — 181 с.
- [4] **Volyar, A.** Structural stability of spiral vortex beams to sector perturbations / A. Volyar, Ya. Akimova // Applied Optics. — 2021. — Vol. 60. — № 28. — P. 8865-8874.

- [5] **Volyar, A.** Control of the orbital angular momentum via radial numbers of structured Laguerre–Gaussian beams / A. Volyar, E. Abramochkin, Ya. Akimova, M. Bretsko // Optics Letters. — 2022. — Vol. 47. — №10. — P. 2402-2405.
- [6] **Kotlyar, V. V.** Topological charge of a linear combination of optical vortices: topological competition / V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, and A. V. Volyar. — Opt. Express. — 2020. — Vol. 28. — P. 8266–8281.

## **Is the stability of a structured vortex beam violated when information is carried in its degree of freedom?**

*A. Volyar<sup>1</sup>, E. Abramochkin<sup>2</sup>, M. Bretsko<sup>1</sup>, Ya. Akimova<sup>1</sup>, Yu. Egorov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Physics and Technology, Simferopol, Russia

<sup>2</sup> Samara Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the P.N. Lebedev RAS, Samara, Russia

A comparison is made of the structural stability of two families of structured beams subject to internal perturbations: a structured Laguerre-Gaussian beam (sLG) and a structured helical vortex beam (sSV). It is shown that in the absence of regular excitation, random perturbations radically change the contour of the caustic surface, which leads to a violation of the matching conditions in the composition of the unperturbed SV beam. It is shown that a change in the phase parameter does not affect the process of structural stability of two families of structured beams.

*Keywords:* Structural stability, Spiral beam, Spectrum of vortices.

# Анализ проблем перемещений в пространстве компактного атомного интерферометра на основе дифракционной решетки

*А. П. Вялых, А. В. Семенко, А. А. Луговой, Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев*

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, 141570 Московская обл., Солнечногорск, пос. Менделеево

Исследован ключевой узел атомного интерферометра на основе дифракционной решётки – блок опорных интерферометров, представляющий собой несколько резонаторов Фабри-Перо на единой основе из ULE-стекла. Получены и проанализированы дрейфы частот продольных мод резонаторов на различных временах измерений, найдены их причины. Исследована степень соответствия флуктуаций частот двух резонаторов в зависимости от пространственной ориентации блока опорных интерферометров.

*Ключевые слова:* Оптика, Резонатор, Лазер, Стабилизация, Атомный интерферометр.

*Цитирование:* Вялых, А. П. Анализ проблем перемещений в пространстве компактного атомного интерферометра на основе дифракционной решетки / А. П. Вялых, А. В. Семенко, А. А. Луговой, Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. —Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 68–70.

## Введение

В настоящее время разработка компактных атомных интерферометров и оптических стандартов частоты на их основе ведётся многими лабораториями мира [1-2]. В разрабатываемом компактном атомном интерферометре нейтральные атомы иттербия предполагается охлаждать в магнитооптической ловушке, формируемой с помощью лазеров и голографической дифракционной решётки, а затем помещать в оптическую решётку. Частоту лазеров, необходимых для работы атомного интерферометра, необходимо стабилизировать. Для этой цели был изготовлен компактный блок опорных интерферометров (БОИ).

### 1. Описание блока опорных интерферометров

БОИ представляет собой два резонатора, основой которых служит единый блок из ULE-стекла. Резонаторы снабжены дихроичными зеркалами, отражательные характеристики которых подобраны так, что в каждый резонатор можно заводить по два лазерных луча атомного интерферометра: 798 нм – удвоенная длина волны первичного охлаждения атомов иттербия, 1112 нм – удвоенная длина волны вторичного охлаждения, 759 нм – оптическая решётка, 1157 нм – удвоенная длина волны часового лазера, который предполагается стабилизировать по атомному переходу. Идея использования единой ULE-основы состоит в переносе стабильности часового лазера на все остальные лазеры благодаря тому, что параметры основы ULE для обоих резонаторов должны меняться одинаково. Эти изменения обнаруживаются при помощи часового лазера и компенсируются сразу для всех каналов излучения. Для перестройки частот БОИ и формирования сигнала стабилизации PDH (Паунда

– Дривера – Холла) на каждый канал излучения установлен электрооптический модулятор. Выходными сигналами БОИ являются пропускание интерферометра, сигнал PDH и изображение с камеры для каждого из четырёх каналов.

## 2. Эксперименты с БОИ

Компактный атомный интерферометр должен быть перевозимым, что неизбежно ведёт к изменению пространственной ориентации его узлов во время перевозки и после установки в новом месте. На данном этапе проведено исследование одного компонента атомного интерферометра и изучена степень связи частотных флуктуаций двух резонаторов в зависимости от пространственной ориентации БОИ.

Для изучения корреляции флуктуаций частот двух резонаторов (располагаются на единой ULE-основе) и определения степени их соответствия излучение 1157 нм от высокостабильного лазера с шириной линии порядка 10 Гц, стабилизированного по внутреннему резонатору, посылалось на два канала БОИ. PDH-сигналы считывались многофункциональным устройством MoKu: Lab и использовались для подстройки частот двух каналов БОИ к частоте лазера. Сигнал рассогласования каналов получен при корреляционном анализе частотных дрейфов для обоих резонаторов.

Для определения кратковременного и долгосрочного частотных дрейфов БОИ был использован тот же высокостабильный лазер на 1157 нм. Определена основная причина долгосрочного дрейфа – изменение температуры в комнате, кратковременный дрейф однозначно коррелируют с работой кондиционеров.

## Заключение

В работе был выполнен анализ частотных дрейфов блока опорных интерферометров для перспективного компактного атомного интерферометра на дифракционной решётке. Исследована степень связи флуктуаций частоты двух резонаторов, выполненных на единой основе при стационарном положении БОИ и при изменении его пространственной ориентации.

## Список источников

- [1] **D. Morris et al.**, Development of a Portable Optical Clock // 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), pp. 1-3, 2019.
- [2] **Brand Wesley, et al.**, Portable Yb Optical Lattice Clock: Towards Precision Measurement Outside the Lab // APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts, 2019.

# **Analysis of the problems of displacements in space of a compact atomic interferometer based on a diffraction grating**

*A. P. Vyalyk, A. V. Semenko, A. A. Lugovoy, G. S. Belotelov, D. V. Sutyryn, S. N. Slyusarev*

FSUE «All-Russian Research Institute of Physico-Technical and Radiotechnical Measurements»,  
Moscow region, Mendeleevo, Russia

The key unit of an atomic interferometer based on a diffraction grating – a block of reference interferometers, which is several Fabry-Perot resonators on a common base of ULE-glass, has been studied. The frequency drifts of the longitudinal modes of the resonators are obtained and analyzed at different measurement times, and their causes are found. The degree of correlation between the frequency fluctuations of two resonators depending on the spatial orientation of the block of reference interferometers has been studied.

*Keywords:* Optics, Cavity, Laser, Stabilization, Atomic interferometer.

# Компактный атомный спектроскоп с отражателем в виде дифракционной решетки

А. В. Семенко<sup>1</sup>, А. А. Луговой<sup>1</sup>, А. П. Вялых<sup>1</sup>, Г. С. Белотелов<sup>1</sup>, М. В. Шишова<sup>2</sup>, Д. В. Сутырин<sup>1</sup>, С. Н. Слюсарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, 141570 Московская обл., Солнечногорск, пос. Менделеево

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Россия, Москва

В данной работе мы рассматриваем разработку прототипа следующего поколения ОСЧ на нейтральных атомах с использованием однолучевого охлаждающего излучения. Ранее была реализована конструкция спектроскопа ОСЧ с использованием конусного отражателя. Рассмотрены вопросы реализации спектроскопа с использованием отражателя на дифракционных голографических решетках.

*Ключевые слова:* Оптика, Голографическая решетка, Дифракционная решетка, Ультрахолодные атомы, Спектроскопия, Магнито-оптическая ловушка.

*Цитирование:* Семенко, А. В. Компактный атомный спектроскоп с отражателем в виде дифракционной решетки / А. В. Семенко, А. А. Луговой, А. П. Вялых, Г. С. Белотелов, М. В. Шишова, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 71–73.

Оптические стандарты частоты (ОСЧ) на ультрахолодных атомах на данный момент достигли неопределенности на уровне  $1e^{-18}$  [1]. Стационарные ОСЧ уже применяются для калибровки шкал времени [2]. В нескольких технологически развитых странах разработаны мобильные ОСЧ или ведутся работы по их созданию. Перспективным является создание еще более компактных портативных ОСЧ, но для этого необходимо уменьшение массы, габаритов спектроскопа, электроники, лазерных систем.

В данной работе мы рассмотрим конструкцию макета портативного спектроскопа ОСЧ на ультрахолодных атомах иттербия. Поток горячих атомов из испаряющего источника, направленный в вакуумную камеру, тормозится под влиянием магнитных полей и оптического излучения, формируя магнито-оптическую ловушку (МОЛ). После первичного и вторичного охлаждения температура атомов в МОЛ достигает десятков мкК. Столь холодные атомы могут быть загружены в оптическую решетку, формируемую лазером с высокой интенсивностью. В таком состоянии атомы практически изолированы от влияния внешних возмущений, и становится возможным зарегистрировать узкий «часовой» переход в атомах иттербия  $^1S_0-^3P_0$ .

В классической схеме формирования МОЛ электромагнитное поле для удержания атомов создается с использованием трех взаимно перпендикулярных лучей. Такая конструкция, однако, является достаточно громоздкой. Заменой трехлучевой МОЛ может служить однолучевая МОЛ, в которой излучение охлаждающих лазеров заводится с одного направления и формирует электромагнитное поле в центре камеры с помощью отражающего элемента. К настоящему времени уже был реализован и в данный момент исследуется макет



портативного однолучевого спектроскопа с использованием конического отражателя либо наклонных призм. Размеры спектроскопа составляют примерно  $30 \times 70 \times 10$  см при диаметре вакуумной камеры 8 см. Заменяв конический отражатель плоской дифракционной решеткой, можно добиться еще большей компактности спектроскопа.

Дифракционная решетка [3] должна работать с одинаковым углом отражения дифракционного максимума на двух длинах волн излучения лазеров: 399 нм для первичного и 556 нм для вторичного охлаждения. Так как дифракционная решетка с одинаковым периодом штрихов будет отражать излучение разных длин волн под разными углами, необходимо рассмотреть различные геометрические конфигурации решеток, например, решетку из двух видов чередующихся секций с разным периодом штрихов. Для такого варианта реализации еще более критичным становится параметр дифракционной эффективности, так как половина излучения, падающая на не соответствующую его длине волны секцию, отражается под другим углом и не участвует в формировании МОЛ.

Для еще большей компактизации спектроскопа предлагается рассмотреть замену внешних магнитных катушек на плоскую конструкцию, формирующую требуемое магнитное поле [4]. В этом случае дифракционную решетку можно разместить непосредственно на поверхности плоской конструкции, но предусмотреть, что при работе такая конструкция сильно нагревается, и от решетки потребуются высокая термостойчивость.

### Заключение

В докладе обсуждается прототип компактного спектроскопа. Рассмотрена замена конического отражателя на дифракционную решетку. Предложено несколько вариантов реализации и определены требования к дифракционным решеткам.

### Список источников

- [1] **Bloom, B. J.** An optical lattice clock with accuracy and stability at the  $10^{-18}$  level / T. Nicholson, Williams J et al // Nature. — 2014. — Т. 506. — №. 7486. — С. 71–75.
- [2] **Riehle F.** The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures / F. Riehle, P. Gill, F. Arias, L. Robertsson // Metrologia. — 2018. — Т. 55. — №. 2. — С. 188.
- [3] **Vangeleyn M.** Laser cooling with a single laser beam and a planar diffractor / M. Vangeleyn, P. F. Griffin, E. Riis, A. S. Arnold // Optics letters. — 2010. — Т. 35. — №. 20. — С. 3453–3455.
- [4] **Ritter R.** Atomic vapor spectroscopy in integrated photonic structures / R. Ritter, N. Gruhler, W. Pernice, H. Kübler, T. Pfau, R. Löw // Applied Physics Letters. — 2015. — Т. 107. — №. 4. — С. 041101.

# Compact atomic spectroscope with a diffraction grating reflector

*A. V. Semenko<sup>1</sup>, A. A. Lugovoy<sup>1</sup>, A. P. Vyalykh<sup>1</sup>, G. S. Belotelov<sup>1</sup>, M. V. Shishova<sup>2</sup>, D. V. Sutyryn<sup>1</sup>, S. N. Slyusarev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> All-Russian Research Institute of Physico-Technical and Radiotechnical Measurements, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In this paper, we consider the development of a prototype of the next generation of neutral-atom optical clocks using single-beam cooling radiation. Previously, the design of an optical clocks spectroscopy using a cone reflector was implemented. The issues of implementing a spectroscopy using a reflector on diffraction holographic gratings are considered.

*Keywords:* Optics, Holographic grating, Diffraction grating, Cold atoms, Spectroscopy, Magneto-optical trap.

# Полихроматические пучки Бесселя–Гаусса

Ю. Егоров, Я. Акимова, М. Брецько, А. Воляр, С. Халилов

КФУ им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт, Симферополь, Россия

В данном научном исследовании нами будет показана возможность формирования полихроматических пучков Бесселя-Гаусса как нулевого, так и первого порядков, при помощи широкодиапазонных некогерентных источников света, а доказательством создания таких типов пучков послужат интерференционные картины.

*Ключевые слова:* Полихроматический пучок Бесселя-Гаусса, Топологический заряд, Топологический квадруполь.

*Цитирование:* **Егоров, Ю.** Полихроматические пучки Бесселя–Гаусса / Ю. Егоров, Я. Акимова, М. Брецько, А. Воляр, С. Халилов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 74–77.

## Введение

Как хорошо известно, когерентность оптического волнового фронта играет ключевую роль в формировании инвариантных световых полей Лагерра-Гаусса, Эрмита-Гаусса и Бесселя-Гаусса и представляют интерес в областях кристаллографии, генерации плазмы, и т.п. Если мы будем рассматривать оптическое излучение как суперпозицию конических волн, то сразу становится ясно, что когерентность то базовое свойство, которое играет ключевую роль в формировании таких типов пучков. В данной работе мы на примере пучков Бесселя-Гаусса покажем, что данный тип пучков может быть сформирован при помощи источников света, которые являются временно некогерентными широкодиапазонными (полихроматическими). Используя данный тип источников излучения, мы поясним, каким образом сформированные пучки зависят от функции ширины спектра.

## 1. Полихроматические пучки Бесселя

Из канонических учебников [1] нам хорошо известно, что характерной волновой характеристикой является дифракция света, которая возникает, если источник излучения является точечным и промодулирован по фазе или амплитуде, что приводит к интерференции волнового фронта с последующим возникновением дифракционных порядков. Дифракция, с точки зрения квантовой механики связана напрямую с представлением де Бройля о частице и принципом неопределенности Гейзенберга и, самое главное, связана напрямую с длиной волны, которая обратно пропорциональна моменту частицы. Именно с этой точки зрения решения уравнения Гельмгольца являются инвариантами и так называемые псевдо-недифрагирующие пучки получили значительный интерес к изучению.

В данной работе нами было показано, что когерентность светового излучения серьёзнейшим образом влияет на формирование пучков Бесселя-Гаусса при условии отсутствия дисперсии для различных типов излучения, как для фемптосекундного, так и для

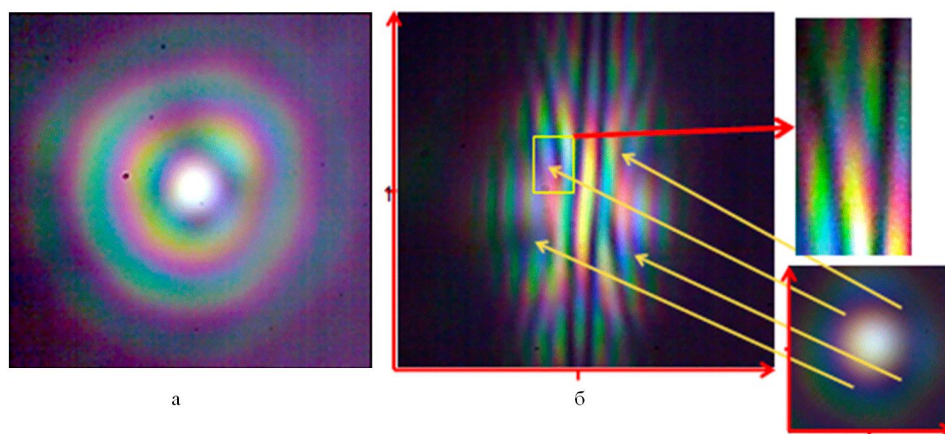
непрерывного излучения. Как показывают наши исследования, источники полихроматического света действительно позволяют формировать пучки Бесселя-Гаусса, что, в конечном счете, позволяет нам положительно оценивать свойства таких пучков с учетом пространственной и временной когерентности поля.

Основной характеристикой при формировании пучков Бесселя-Гаусса или других недифрагирующих пучков, является соблюдение требований, связанных с пространственной когерентностью источника оптического излучения [3]. Нами было сформировано недифрагирующее световое распределение поля, которое обладало пространственной когерентностью, но при этом временная когерентность полностью отсутствовала.

Для формирования полихроматических пучков Бесселя-Гаусса была создана экспериментальная установка. Свет от источника оптического излучения при помощи зеркально-линзового конденсора и ахроматического микрообъектива фокусировался на входной торец оптического волокна с диаметром сердцевины 7,5 мкм и диаметром оболочки 27,5 мкм.

Как показали наши исследования, использование оптического волокна крайне необходимо в связи с тем, что источник полихроматического света не является когерентным. Для создания такого источника излучения с пространственной когерентностью нами были проанализированы и проверены различные виды оптических волокон с сердцевиной от 5 до 100 мкм. Как оказалось если волокно имеет большой диаметр сердцевины, то интенсивность излучения торца волокна достаточная для формирования пучка Бесселя, но сама картина является размытой вследствие малой длины когерентности. С другой стороны, если мы используем оптическое волокно с малым диаметром, то в этом случае мы можем наблюдать высококонтрастный пучок Бесселя. Но в данном случае интенсивность сформированной картины не позволяет нам зафиксировать требуемое нам изображение.

После прохождения излучения через оптическое волокно мы формировали коллимированный пучок диаметром 5мм, с помощью ахроматического микрообъектива. В последствии коллимированный пучок направлялся на аксикон - коническую линзу. Фокальную зону, сформированную конической линзой, мы проецировали ахроматическим микрообъективом на CMOS камеру. Результаты представлены на Рис.1а.



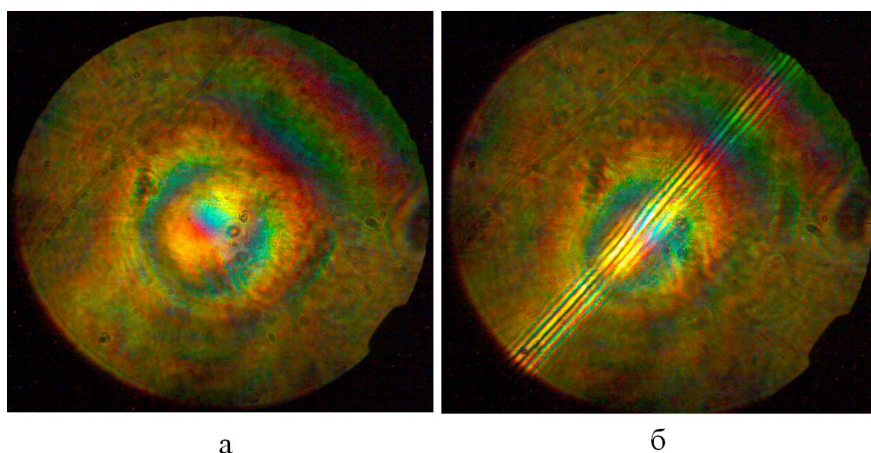
**Рис. 1.** Пучок Бесселя-Гаусса нулевого порядка (а) и его интерференционная картина (б)

Анализ интерференционной картины, сформированной бипризмой Френеля, и представленной на Рис. 1 (б) указывает на то, что на оси в центре пучка гладкий волновой фронт, а вблизи оси наблюдаются регулярные интерференционные полосы. Как можно заметить интерференционные полосы имеют нерегулярную структуру, и их искажение формирует «вилочную» структуру. Следует отметить, что «вилки» в классической интерференционной картине являются структурами, которые получили название – оптические вихри и соответствуют точкам волнового фронта, где амплитуда обращается в ноль, а фаза не определена [4,6].

Наличие вилок в пучке Бесселя-Гаусса нулевого порядка характеризуется типологическим квадруполем. Ориентация «вилки» характеризует знак топологического заряда оптического вихря. Как можно заметить из Рис. 1 (б) нижние и верхние «вилки» одинаковы, но соответствуют разным топологическим зарядам

Нами были проведены сравнения оптических свойств недифрагирующих полей при использовании различных типов световых источников. В данном исследовании нами было показано, что существует возможность создания полихроматических пучков Бесселя не только нулевого, но и второго порядков.

В результате распространения недифрагирующего пучка Бесселя через систему поляризатор – кристалл – поляризатор [7,8] на оси пучка было сформировано изображение (Рис. 2а) с минимумом интенсивности, что соответствует оптическому вихрю.



**Рис. 2.** Пучок Бесселя-Гаусса первого порядка (а) и его интерференционная картина (б)

При детальном изучении сформированной интерференционной картины (Рис. 2б) при помощи бипризмы Френеля, на оси пучка мы можем наблюдать цветную «вилку», которая полностью совпадает с расположением минимума интенсивности пучка Бесселя-Гаусса первого порядка. Данный факт свидетельствует о том, что наши предварительные предположения о наличии оптического вихря на оси полихроматического пучка Бесселя-Гаусса первого порядка, полностью подтвердилось.

### 3. Выводы

В данной работе на примере пучков Бесселя-Гаусса показано, что данный тип пучков может быть сформирован при помощи источников света, которые являются временно некогерентными широкодиапазонными (полихроматическими). В данной работе нами было показано, что когерентность светового излучения серьезнейшим образом влияет на формирование пучков Бесселя-Гаусса при условии отсутствия дисперсии для различных типов излучения, как для фемтосекундного, так и для непрерывного излучения. Как показывают наши исследования, источники полихроматического света действительно позволяют формировать пучки Бесселя-Гаусса нулевого и первого порядков и представляют интерес в областях кристаллографии, генерации плазмы, и др.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № № 20-37-90068, № 20-37-90066, № 19-29-01233).

### Список источников

- [1] **Nye, J.F.** Natural Focusing and Fine Structure of Light. Caustics and Wave Dislocations / J.F. Nye. — Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing., 1999. — 327 p.
- [2] **Снайдер, А.** Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Дж. Лав. — М.: Радио и связь, 1987. — 656 с.
- [3] **Fischer, P.** White light propagation invariant beams / P. Fischer, C.T.A. Brown, J.E. Morris, C. López-Mariscal, E.M. Wright, W. Sibbett, K. Dholakia // Optics Express. — 2005. — Vol. 13. — № 17. — P. 6657.
- [4] **Soifer, V. A.** Laser beam mode selection by computer-generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub - Boca Raton: CRC Press., — 1994. — 224 p.
- [5] **Kotlyar, V.V.** Vortex Laser Beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev - Boca Raton: CRC Press., — 2018. — 404 p.
- [6] **Basisty, I.** Optical wavefront dislocations and their properties / I. Basisty, M. Soskin, M. Vasnetsov // Opt. Commun. — 1995. — Vol. 119. — P. 604-612.
- [7] **Volyar, A.V.** Vector singularities of Gaussian beams in uniaxial crystals: Optical vortex generation / A. V. Volyar, T.A Fadeeva, Y.A. Egorov // Technical Physics Letters. — 2002. — Vol. 28. — № 11. — P. 958-961.
- [8] **Volyar, A.V.** Fine structure of white optical vortices in crystals / A.V. Volyar, Y.A. Egorov, A. Rubass, T. A. Fadeeva // Technical Physics Letters. — 2004. — Vol. 30. — № 8. — P. 701-704.

## Polychromatic Bessel–Gauss beams

*Yu. Egorov, Ya. Akimova, M. Bretsko, A. Volyar, S. Halilov*

Crimean Federal V.I. Vernadsky University, Institute of Physics and Technology, Simferopol, Russia.

In this scientific study, we will show the possibility of forming polychromatic Bessel-Gauss beams of both zero and first orders using wide-range incoherent light sources, and interference patterns will serve as proof of the creation of such types of beams.

*Keywords:* Polychromatic Bessel-Gauss beam, Topological charge, Topological quadrupole.

# Прямая запись субволновых микроструктур на пленках аморфного кремния излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 405 \text{ nm}$

А. А. Кутанов<sup>1</sup>, В. П. Корольков<sup>2</sup>, Н. Сыдык уулу<sup>1</sup>, Р. И. Куц<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики имени академика Ж. Ж. Жеенбаева, Национальная Академия наук, Бишкек, Киргизия

<sup>2</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследованы спектры поглощения тонких пленок аморфного кремния и возможности записи на них микроструктур излучением полупроводникового лазера с  $\lambda=405 \text{ nm}$ . Получены результаты полутонковой прямой лазерной записи микроструктур на пленках аморфного кремния с шириной линий  $\sim 1 \text{ мкм}$  лазерного излучения на лазерном нанолитографе. Зафиксировано увеличение толщины пленок на облученных участках пленок кремния под тепловым действием лазерного излучения при переходе аморфного кремния в кристаллическую структуру. Нелинейная зависимость диаметра записываемого элемента на пленках аморфного кремния от энергии импульса лазера позволяет записывать микроструктуры размером меньше длины волны при изготовлении фотошаблонов и дифракционных оптических элементов

*Ключевые слова:* Аморфный кремний, прямая лазерная запись, оптика, голография, дифракционные оптические элементы.

*Цитирование:* Кутанов, А. А. Прямая запись субволновых микроструктур на пленках аморфного кремния излучением полупроводникового лазера с  $\lambda = 405 \text{ nm}$  / А. А. Кутанов, В. П. Корольков, Н. Сыдык уулу, Р. И. Куц // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 78–83.

## Введение

Прямая лазерная запись на пленках аморфного кремния в отсутствие мокрой химической обработки представляет интерес для высокоразрешающей записи фотошаблонов и дифракционных оптических элементов [1]. При создании лазерных записывающих систем (ЛЗС) для записи фотошаблонов и дифракционных оптических элементов (ДОО) необходимо выбрать оптимальный лазер и регистрирующую среду. Для этой цели требуется определить условия, когда энергия лазерного излучения наиболее эффективно поглощается в регистрирующей среде. Поэтому на однолучевом спектрофотометре Helios Omega измерены спектры поглощения пленок *a-Si* толщиной 0,2–0,7 мкм, нанесенных на подложке стекла методом магнетронного напыления. В качестве подложек были использованы стекла толщиной 1,25 мм. В работе актуальна задача исследования возможности полутонковой прямой лазерной записи на *a-Si* излучением полупроводникового лазера с  $\lambda = 405 \text{ nm}$ .

### 1. Измерение спектров поглощения тонких пленок *a-Si*

Тонкие пленки аморфного кремния толщиной 0,2–0,7 мкм на стеклянной подложке для измерения спектра поглощения пленки *a-Si* были получены на магнетронной

распылительной системе [2]. Измерения спектров поглощения пленок  $\alpha$ -Si на стеклянной подложке были выполнены с использованием однолучевого спектрофотометра Helios Omega. Базовая линия сканировалась на чистом стекле и после этого на держатель образца прикреплялся носитель с пленкой  $\alpha$ -Si нанесенной на стекло. Были измерены спектры поглощения пленки аморфного кремния толщиной от 0,2, 0,5 и 0,7 мкм (Рис.1). Видно, что максимум поглощения света приходится на область длин волн 300...360 нм.

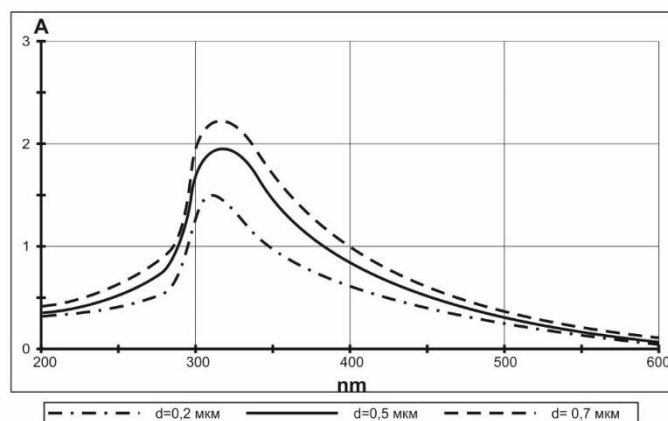


Рис. 1. Спектры поглощения тонких пленок  $\alpha$ -Si.

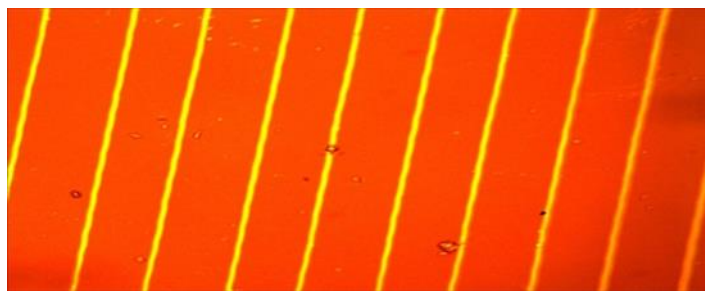
На основе проведенных измерений сделан вывод, что для прямой записи на слоях  $\alpha$ -Si наиболее предпочтительны лазеры с длиной волны 355–405 нм. Ранее, прямая лазерная запись с использованием твердотельного лазера с диодной накачкой DPSS ( $\lambda = 355$  нм) исследовалась в работе [1]. В настоящей работе исследуются возможности полутонковой прямой лазерной записи на  $\alpha$ -Si излучением полупроводникового лазера с  $\lambda=405$  нм.

## 2. Полутонковая прямая лазерная запись на $\alpha$ -Si

Излучение лазера локально вызывает кристаллизацию тонких пленок аморфного кремния и изменение показателя преломления, посредством быстрого нагрева и отвердевания [1], а также образование поверхностного рельефа. Это дает возможность прямой лазерной записи дифракционных структур, исключив традиционные технологические этапы, такие как проявка, травление и т.п.

В предварительных экспериментах для прямой записи на аморфном кремнии использовался 120 мВ одномодовый Blu-Ray лазер с длиной волны 405 нм. Лазерный луч коллимировался с помощью асферической линзы после лазера, а затем он фокусировался микрообъективом на носитель записи. Длительность лазерных импульсов и их частота контролировалась от компьютера. На Рис.2 приведена фотография, снятая на микроскопе в проходящем свете для линий записанных с помощью одномодового Blu-Ray лазера на пленки  $\alpha$ -Si на стеклянной подложке. При записи пластина непрерывно перемещается с помощью 2D позиционирующего устройства, а серия импульсов лазера записывает последовательность микроструктур.





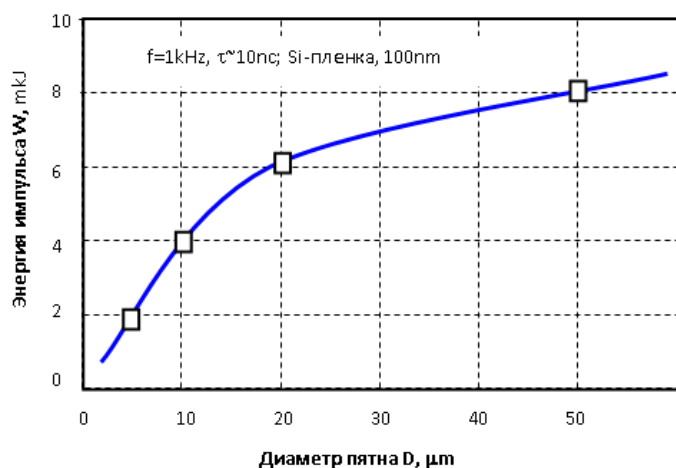
**Рис. 2.** Микрофотография дорожек, записанной прямой лазерной записью на слое аморфного кремния одмомодовым полупроводниковым лазером с мощностью 120 мВт

При гауссовом распределении интенсивности излучения лазерного пучка и благодаря нелинейному характеру записи имеется возможность записи микроструктуры на пленках а-Si при диаметре сфокусированного лазерного луча

$$D \sim \lambda/NA, \quad (1)$$

где NA- числовая апертура записывающего объектива, которая для сухого высоко апертурного объектива будет достигать значения 0,95.

На Рис. 3 приведен график зависимости ширины следа на пленке аморфного кремния от энергии импульса лазера.

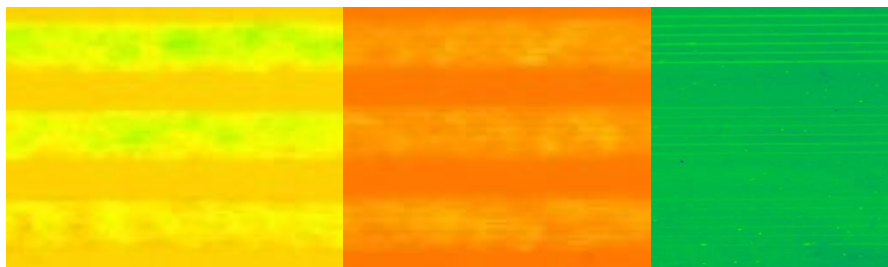


**Рис. 3.** График зависимости ширины следа на пленке а-Si от энергии импульса лазера. Данный график показывает нелинейный характер процесса записи на слое аморфного кремния при воздействии УФ лазерного излучения.

### 3. Запись микроструктур на тонких пленках а-Si излучением полупроводникового лазера с $\lambda=405 \text{ nm}$

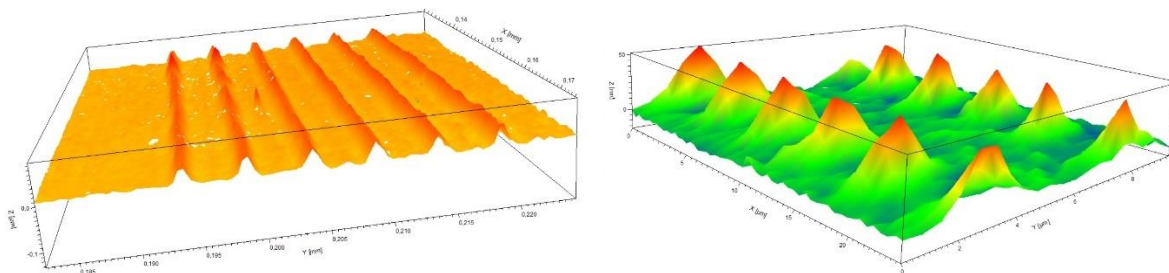
Эксперименты по полутонковой лазерной записи на тонких пленках аморфного кремния проводились также на прецизионном сканирующем X-Y лазерном нанолитографе (ЛНЛ), разработанном в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН. Для повышения степени плоскостности формируемого волнового фронта коллимированного лазерного пучка перед фокусирующим объективом в ЛНЛ использовался пространственный фильтр с диафрагмой диаметром 10мкм. Проведены эксперименты с изменением мощности лазера от 2 до 60 мВт,

длительность импульсов равнялась 2 мкс, расстояние между импульсами изменялось по координате x-y от 250-5000 нм. С изменением мощности лазера и длительности по координатам x-y получены полутонные записи на пленках аморфного кремния, что показано на рис. 4. Оптическая схема ЛНЛ [2] позволяет формировать в фокальной плоскости записывающего объектива сфокусированное пятно размером ~350 нм для записи на пленки a-Si.



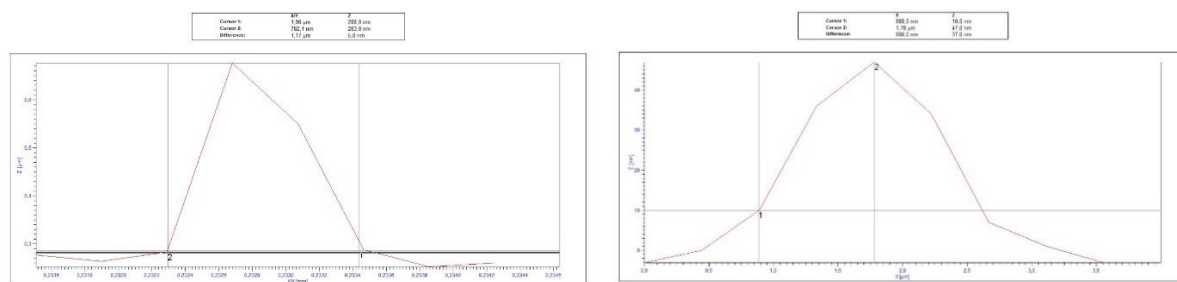
**Рис 4.** Микрофотография полутонных тестовых записей на пленке a-Si.

На рис. 5. видно что из результаты записанных контрастных изображений показывают, структурные и морфологические изменения на поверхности пленок аморфного кремния. На участках лазерного воздействия кремний переходит из неупорядоченной аморфной фазы в упорядоченную кристаллическую структуру. Переход к упорядоченному расположению атомов с увеличением расстояния между ними приводит к увеличению объема и появлению рельефа на поверхности аморфного кремния. Полученные график показывает образование рельефа на пленках a-Si.



**Рис. 5.** Профилограмма записанного микрорельефа, снятая на интерференционном сканирующем микроскопе белого света WLI в режиме на отражение

Используя вычислительные функции программы интерференционного сканирующего микроскопа, определили ширину и высоту рельефа. Под действием сфокусированного лазерного излучения на пленку аморфного кремния при его переходе в кристаллическое состояние ширина дорожек составляет ~1 мкм, размер рельефа ~40 нм.



**Рис. 6.** График определения ширины дорожек и образовавшихся рельефов при переходе аморфного кремния в кристаллическую структуру

## Заключение

Экспериментально продемонстрированы возможности полутонковой записи на плёнках а-Si излучением полупроводникового лазера с  $\lambda = 405$  нм. Зафиксировано образование поверхностного рельефа под действием сфокусированного лазерного излучения на пленку аморфного кремния при его переходе в кристаллическое состояние. Измерения поверхностного рельефа проводилось на интерференционном сканирующем микроскопе белого света WLI. Нелинейная зависимость диаметра записываемого элемента на аморфном кремнии от энергии импульса лазера представляет возможность использовать тонкие пленки аморфного кремния для полутонковой записи микроструктур при изготовлении фотомасок и дифракционных оптических элементов.

Полутонковая прямая лазерная запись на тонких слоях а-Si позволяет проводить запись микроструктур с высоким разрешением для изготовления дифракционных оптических элементов.

## Список источников

- [1] **Полещук, А. Г.** Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур / А. Г. Полещук, А. А. Кутанов, В. П. Бессмельцев, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, А. И. Малышев, А. Е. Маточкин, Н. В. Голошевский, К. В. Макаров, В. П. Макаров, И. А. Снимщиков, Н. Сыдык уулу // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – №. 2. – С. 86-96.
- [2] **Сыдык уулу, Н.** Исследование прямой записи микрорельефа на двухслойной структуре а-Si/Ag / Н. Сыдык уулу, А. А. Кутанов, З. М. Казакбаева // Сборник международной конференции СибОптика-2021, Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей — Россия, Новосибирск : СГУГиТ. — 2021. — С. 229–235.
- [3] **Корольков, В. П.** Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко // Сборник международной конференции СибОптика-2019, Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей — Россия, Новосибирск : СГУГиТ. — 2019. — С. 28–33.

# Direct recording of microstructures on amorphous silicon films by semiconductor laser radiation with $\lambda=405$ nm

*A. A. Kutanov<sup>1</sup>, V. P. Korolkov<sup>2</sup>, N. Sydyk uulu<sup>1</sup>, R. I. Kuts<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Physics named after Academician Z. Z. Zheenbaev, National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyzstan

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

The absorption spectra of amorphous silicon thin films and the possibility of writing microstructures on them by radiation of a semiconductor laser with  $\lambda=405$  nm have been investigated. The results of halftone direct laser recording of microstructures on amorphous silicon films with a line width of  $\sim 1$   $\mu\text{m}$  of laser radiation on a laser nanolithograph are presented. An increase in the film thickness on the irradiated areas of silicon films under the thermal action of laser radiation during the transition of amorphous silicon to a crystalline structure was recorded. Nonlinear dependence of the diameter of the recorded element on amorphous silicon films on the laser pulse energy makes it possible to write microstructures smaller than the wavelength in the manufacture of photomasks and diffractive optical elements

*Keywords:* Amorphous silicon, Direct laser writing, Optics, Holography, Diffractive optical elements.

# Прямая запись микроструктур в пленках карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками

*Н. А. Ивлиев, А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина*

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН, Самара, Россия  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва,  
Самара, Россия

Представлен подход к формированию микрорельефа на поверхности карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками. Рассчитаны распределения сил рассеяния и «поляризационных» неградиентных сил, действующих при этом на поверхность материала. Проведен сравнительный анализ рассчитанных распределений и экспериментальных структур, полученных методом прямой записи. Анализ показал, что структура распределения интенсивности продольной компоненты электрического поля очень хорошо повторяют форму сформированного рельефа. Таким образом, распределение интенсивности продольной компоненты можно использовать в качестве аппроксимирующей функции профиля формируемых структур.

*Ключевые слова:* прямая запись, азополимеры, микроструктуры, структурированные лазерные пучки.

*Цитирование:* **Ивлиев, Н. А.** Прямая запись микроструктур в пленках карбазолсодержащего азополимера структурированными лазерными пучками / Н. А. Ивлиев, А. П. Порфирьев, С. Н. Хонина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 84–87.

## Введение

Исследования в области формирования и обнаружения структурированных световых пучков оказали существенное влияние на множество разработок в области оптических коммуникаций [1–3], оптического зондирования [4], манипулирования [5, 6], квантовой обработки информации [7]. При этом пучки с пространственными распределениями вдоль направления прохождения занимают особое место среди структурированных пучков с трехмерным распределением. Хотя методы создания таких пучков хорошо известны, обнаружение продольной составляющей электрического поля остается сложной экспериментальной задачей [8].

Одним из решений указанной проблемы является использование анизотропных материалов, чувствительных к ориентации поляризации освещающего излучения, например, азобензолсодержащих полимеров (азополимеров). Реакция фотоизомеризации молекул азобензола вызывает массоперенос материала азополимера как на мезо-, так и на макроуровне. При освещении поляризованным светом после поглощения света молекулы азобензола перераспределяются перпендикулярно поляризации света. Массоперенос азополимера, вызванный продольной составляющей света, был продемонстрирован в работах [9, 10], однако представленные там объяснения протекающих процессов противоречивы. К тому же, применяемый материал не позволяет различать поперечную и продольную составляющие, поэтому в настоящей работе предлагается использовать тонкие пленки азополимера,

содержащие карбазол [11], для непосредственной визуализации продольного компонента цилиндрических векторных пучков (ЦВП).

## 1. Расчет характеристик

Ключевое влияние продольной компоненты поля на профили микроструктур, формирующихся на поверхности тонких пленок карбазолсодержащих азополимеров, подтверждается результатами интерференционной регистрации одномерных дифракционных решеток, представленных для интерферирующих лазерных лучей с различными комбинациями состояний поляризации [12].

Для полученных наглядного представления особенностей взаимодействия ЦВП с азополимером были рассчитаны распределения следующих характеристик рассматриваемых пучков: сила рассеяния  $F_s$  (пропорциональна вектору Пойнтинга), градиентная сила  $F_g$ , «поляризационная» неградиентная сила  $F_p$ , дивергенция поляризационной силы  $h_p$ :

$$\mathbf{F}_s \propto \text{Re}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}), \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_g \propto \nabla |\mathbf{E}|^2, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_p \propto (\mathbf{E}^* \cdot \nabla) \mathbf{E}, \quad (3)$$

$$h_p \propto \text{Re}[\nabla \mathbf{F}_p], \quad (4)$$

Численные расчеты распределений полной интенсивности в фокальной плоскости и распределений различных компонент электрического поля исследуемых лазерных пучков проводились с использованием уравнения Ричардса-Вольфа [13].

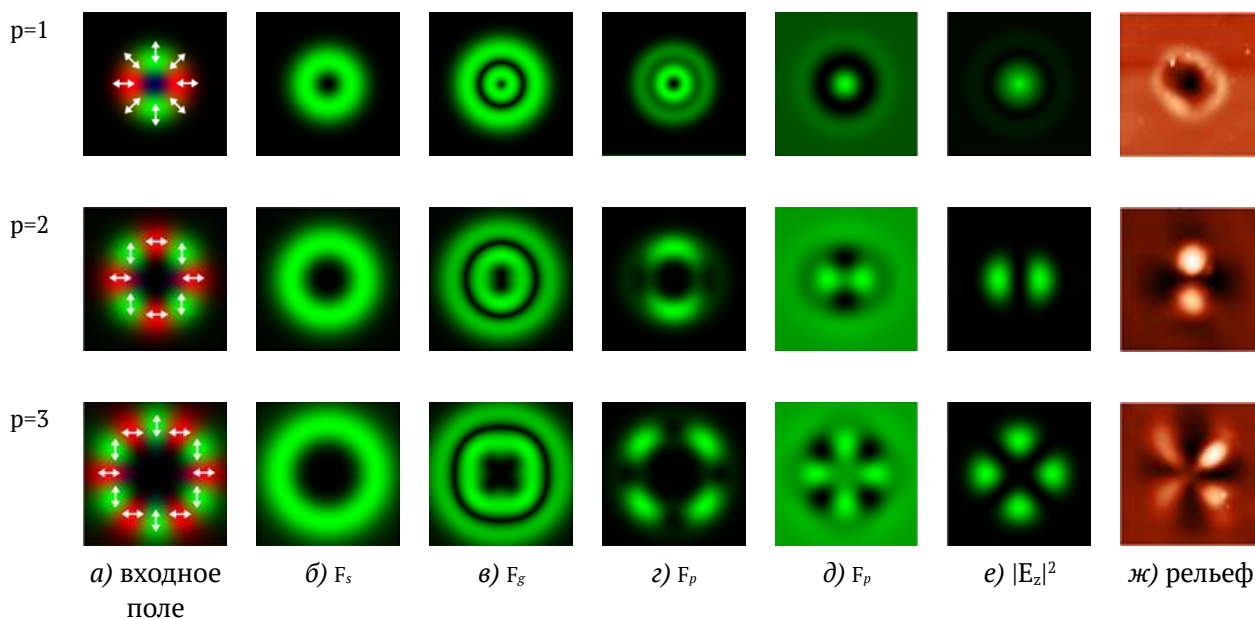
## 2. Анализ результатов

Для реализации прямой лазерной записи микроструктур на поверхности тонких пленок азополимеров, содержащих карбазол, была использована оптическая установка, использующая пространственный модулятор света и подробно описанная в работе [14].

Параметры микрорельефа измерялись с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Solver PRO-M, NT-MDT в полуконтактном режиме.

Сравнение влияния характеристик светового поля, определяемых уравнениями. (1)-(4) на структуру формируемого рельефа в случае ЦВП  $p$ -го порядка представлено на Рис. 1.

Как видно из рис. 1, характеристика  $\text{Re}[\nabla F_p]$  очень хорошо аппроксимирует структуру формируемого рельефа, при этом структура продольной составляющей  $|E_z|^2$  также близка к структуре микрорельефа, сформированного в тонкой азополимерной пленке. Поскольку рассчитать распределение  $|E_z|^2$  гораздо проще, чем  $\text{Re}[\nabla F_p]$ , распределение интенсивности продольной компоненты можно использовать в качестве ожидаемого профиля формируемой структуры.



**Рис. 1.** Сравнение влияния характеристик светового поля, определяемых уравнениями (1)–(4) на структуру формируемого рельефа в случае ЦВП  $p$ -го порядка

### Заключение

Приведенный пример демонстрирует, что карбазолсодержащие азополимеры являются подходящим материалом для использования продольной составляющей электрического поля для создавать микроструктуры с необычной морфологией, отличной от полного распределения интенсивности падающего лазерного луча. В частности, предложен подход к записи и обнаружению продольной компоненты поля в векторных цилиндрических пучках.

### Благодарность

Данная работа была выполнена под эгидой программы «ERA.Net RUS plus» при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-52-76021.

### Список источников

- [1] **Yang, C.** Beam-holding property analysis of the perfect optical vortex beam transmitting in atmospheric turbulence / C. Yang, Y. Lan, X. Jiang, H. Long, J. Hou, S. Chen // Opt. Commun. — 2020. — Vol. 472. — 125879. — DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125879.
- [2] **Wang, J.** Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, JY. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Yan Y, Huang H, et al. // Nat. Photon. — 2012. — Vol. 6. — P. 488–496. — DOI: 10.1038/nphoton.2012.138.
- [3] **Zhu, L.** Free-space data-carrying bendable light communications / L. Zhu, AD. Wang, J. Wang // Sci Rep. — 2019. — Vol. 9. — 14969. — DOI:10.1038/s41598-019-51496-z.
- [4] **Fang, L.** Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects / L. Fang, M.J. Padgett, J. Wang // Laser Photon Rev. — 2017. — Vol. 11. — 1700183. — DOI: 10.1002/lpor.201700183.
- [5] **Padgett, M.** Tweezers with a twist / M. Padgett, R. Bowman // Nat. Photonics. — 2011. — Vol. 5. — P. 343–348. — DOI:10.1038/nphoton.2011.81.
- [6] **Bobkova, V.** Optical grinder: sorting of trapped particles by orbital angular momentum / V. Bobkova, J. Stegemann, R. Droop, E. Otte, C. Denz // Opt. Express. — 2021. — Vol. 29. — P. 12967–12975. — DOI:10.1364/OE.419876.

- [7] **Yoshida, M.** Subtraction imaging by the combination of higher-order vector beams for enhanced spatial resolution / M. Yoshida, Y. Kozawa, S. Sato // *Opt Lett.* — 2019. — Vol. 44. — P. 883–886. — DOI:10.1364/OL.44.000883.
- [8] **Wang, J.** Generation and Detection of Structured Light: A Review / J. Wang, Y. Liang // *A Review. Front. Phys.* — 2021. — Vol. 9. — 688284. — DOI: 10.3389/fphy.2021.688284.
- [9] **Sekkat, Z.** Light-induced orientation in a high glass transition temperature polyimide with polar azo dyes in the side chain / Z. Sekkat, J. Wood, E.F. Aust // *JOSA B.* — 1996. — Vol. 13. — P. 1713–1724. — DOI:10.1364/JOSAB.13.001713.
- [10] **Sekkat, Z.** Pure photoorientation of azo dye in polyurethanes and quantification of orientation of spectrally overlapping isomers / Z. Sekkat, D. Yasumatsu, S. Kawata // *The J. Phys. Chem. B.* — 2002 — Vol. 106. — P. 12407–12417. — DOI:10.1021/jp020132+.
- [11] **Cazac, V.** Polarization holographic recording of vortex diffractive optical elements on azopolymer thin films and 3D analysis via phase-shifting digital holographic microscopy / V. Cazac, E. Achimova, V. Abashkin, A. Prisacar, C. Loshmanshii, A. Meshalkin, and K. Egiazarian // *Opt. Express.* — 2021. — Vol. 29. — P. 9217–9230. — DOI:10.1364/OE.415639.
- [12] **Meshalkin, A.** Carbazole-based azopolymers as media for polarization holographic recording / A. Meshalkin, C. Losmanshii1, A. Prisacar, E. Achimova, V. Abashkin, S. Pogrebnoi., F. Macaev // *Adv. Phys. Res.* — 2019. — Vol. 1. — P. 86–98.
- [13] **Kim, D. Y.** Laser-induced holographic surface relief gratings on nonlinear optical polymer films / D. Y. Kim, S. K. Tripathy, L. Li, J. Kumar // *Appl. Phys. Lett.* — 1995. — Vol. 66. — P. 1166–1168.
- [14] **Porfirev, A.** Writing and reading with the longitudinal component of light using carbazole-containing azopolymer thin films / A. Porfirev, S. Khonina, N. Ivliev, E. Achimova, A. Forbes // *Scientific Reports.* — 2022. — Vol. 12. — 3477 — DOI: 10.1038/s41598-022-07440-9.

## Direct recording of microstructures in carbazole-containing azopolymer films by structured laser beams

*N. A. Ivliev, A. P. Porfirev, S. N. Khonina*

Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics»  
of the RAS, Samara, Russia  
Samara National Research University, Samara, Russia

An approach to the formation of a microrelief on the surface of a carbazole-containing azopolymer by structured laser beams is presented. The distributions of scattering forces and "polarization" non-gradient forces acting on the surface of the material are calculated. A comparative analysis of the calculated distributions and experimental structures obtained by the direct recording method is carried out. The analysis showed that the structure of the distribution of the intensity of the longitudinal component of the electric field very well repeats the shape of the formed relief. Thus, the intensity distribution of the longitudinal component can be used as an approximating function of the profile of the formed structures.

*Keywords:* Direct recording, Azopolymers, Microstructures, Structured laser beams.



# Генерация суперпозиции скалярных вихревых пучков с применением многосекторных бинарных фазовых пластин

В. А. Шкуратова, Г. К. Костюк, А. А. Петров

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты применения изготовленных на плавном кварце многосекторных бинарных фазовых пластин для генерации суперпозиции скалярных вихревых пучков. В качестве инструмента травления секторов в пластинах использовалась лазерно-индуцированная микроплазма, обеспечивающая достижение глубины, требуемой для реализации фазового сдвига ( $\pi$  и  $\pi/2$ ) относительно невытравленных секторов. Качество изготовленных пластин оценивалось с применением контактной профилометрии с вертикальным разрешением  $\pm 10$  нм и оптической микроскопии в режиме дифракционно-интерференционного контраста. Качество функционирования пластин исследовалось путем регистрации распределения интенсивности генерируемых состояний. Измеренная эффективность преобразования Гауссова пучка составила 92%. Одна из пластин была применена в оптической установке с наносекундным лазером (длина волны 1060 нм) для одновременной обработки полированной стали.

*Ключевые слова:* Вихревые пучки, Многосекторные бинарные фазовые пластины, Лазерно-индуцированная микроплазма.

*Цитирование:* Шкуратова, В. А. Генерация суперпозиции скалярных вихревых пучков с применением многосекторных бинарных фазовых пластин / В. А. Шкуратова, Г. К. Костюк, А. А. Петров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 88–91.

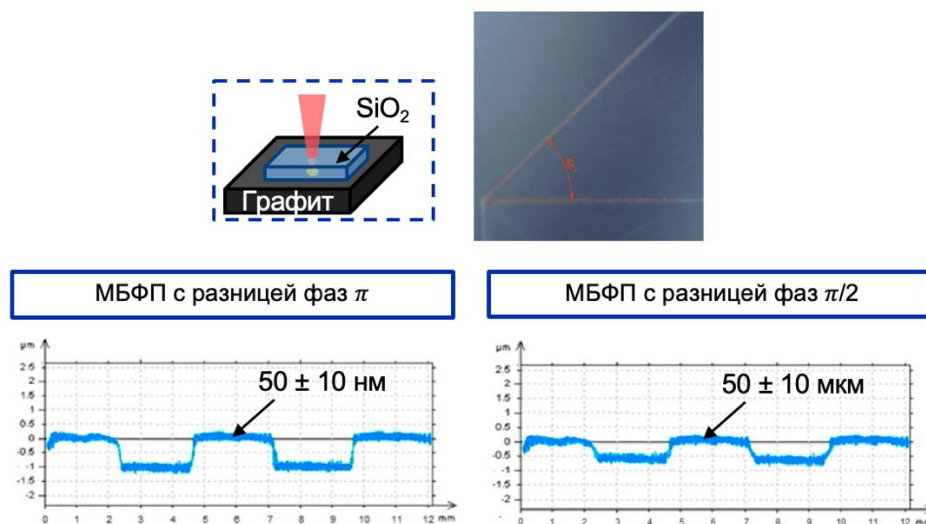
## Введение

На текущий момент значительный интерес проявляется к способам генерации суперпозиции оптических вихревых пучков (ОВП) [1, 2], которые все чаще применяются при лазерной микро- и нанообработке, оптическом манипулировании, в коммуникациях. Многосекторные бинарные фазовые пластины (МБФП) позволяют осуществлять генерацию суперпозиции ОВП [1], осуществляя при этом мультиплицирование Гауссова пучка в серию пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятен (ДОП), окружающих по периметру центральную область с интенсивностью, стремящейся к нулю. Применение МБФП обусловлено простотой их конструирования и надежностью использования по сравнению с другими оптическими элементами. Для изготовления МБФП могут быть использованы литографические методы и прямая лазерная запись фемтосекундными импульсами [1].

## 1. Материалы и методы

В настоящем исследовании для изготовления МБФП с разницей фаз  $\pi$  и  $\pi/2$  на плавном кварце предлагается использовать технологию обработки прозрачных диэлектриков лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) (рис. 1) [3]. Глубина травления секторов для МБФП с разницей фаз  $\pi$  определяется как  $h = \lambda/2(n - 1)$ , для МБФП с разницей фаз  $\pi/2$  –  $h = \lambda/4(n - 1)$ , где  $n$  – показатель преломления материала МБФП,  $\lambda$  – длина волны излучения.

Процесс формирования микрорельефа ЛИМП является многоэтапным: (i) сначала энергия от лазерного излучения преобразуется к энергии плазмы, (ii) затем от энергии плазмы к энергии разрушения материала. Таким образом, результаты воздействия ЛИМП на прозрачный диэлектрик не имеют прямой аналитической зависимости от характеристик лазерного излучения [3], поэтому выбор параметров лазерного облучения для изготовления МБФП осуществлялся экспериментально.



**Рис. 1.** Изготовление МБФП: суть технологии ЛИМП, микрофотография с оптического микроскопа, измеренные профилограммы

Анализ соответствия экспериментально полученных глубин травления секторов МБФП расчетным значениям проводился с использованием контактного профилометра с ошибкой измерения  $\pm 10$  нм. Исследование качества поверхности в вытравленных секторах (в области воздействия ЛИМП) осуществлялась на оптическом микроскопе в дифракционно-интерференционном режиме.

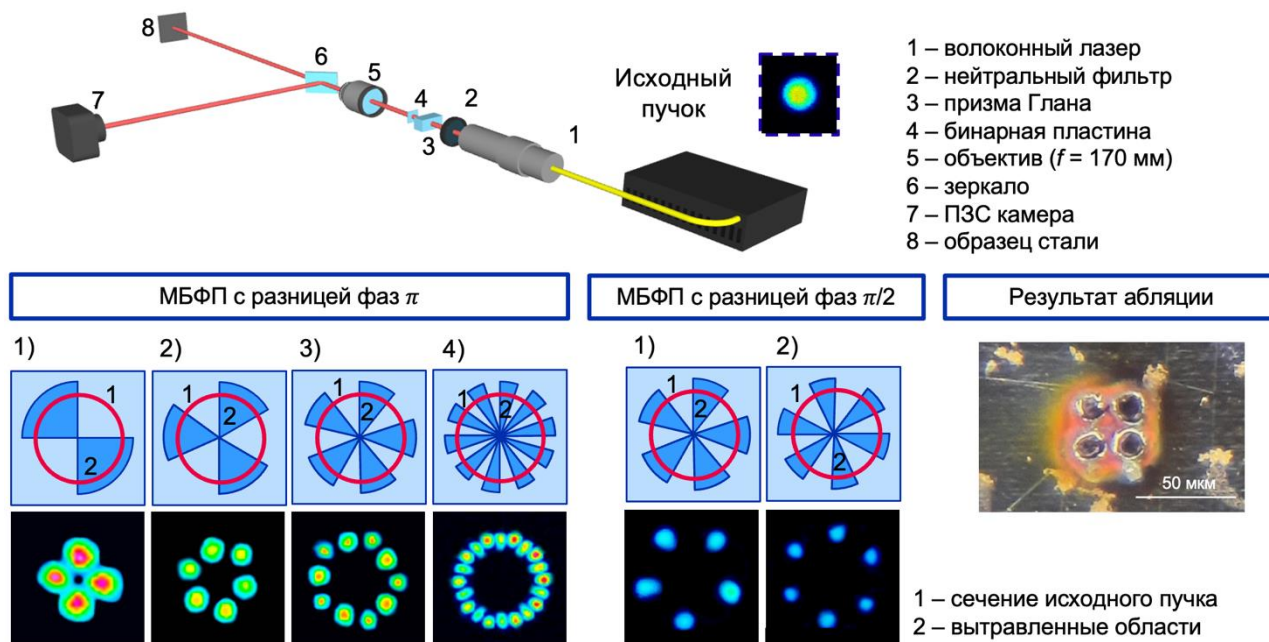
Для оценки качества функционирования МБФП с разницей фаз  $\pi$  и  $\pi/2$ , изготовленных для  $\lambda = 1.06$  мкм, проводилось их тестирование в оптической схеме с применением ПЗС камеры (рис. 2). МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi$  также была применена при лазерной обработке пластины нержавеющей стали. Для оценки эффективности конверсии энергии МБФП проводились измерения мощности лазерного пучка, падающего на МБФП и выходящего из них.

## 2. Результаты

Измеренная на контактном профилометре глубина травления изготовленных МБФП с разницей фаз  $\pi$  составила  $1.180 \pm 0.010$  мкм, с разницей фаз  $\pi/2$  –  $0.590 \pm 0.010$  мкм. Шероховатость поверхности в области воздействия ЛИМП составила  $50 \pm 10$  нм (рис. 1). Микрофотография с оптического микроскопа показывает отсутствие трещин, выколов и напряжений в вытравленных секторах (рис. 1).

Зарегистрированные распределения интенсивности в дальнем поле (рис. 2), полученные с применением изготовленных МБФП, доказали работоспособность элементов и показали, что

количество формируемых в дальнем поле ДОП соответствует количеству секторов в МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi$ , а количество ДОП для МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi/2$  в 2 раза меньше количества секторов. Также было установлено, что при числе секторов, превышающем 10, в формируемом распределении происходит увеличение эллиптичности и сближение ДОП. Измеренная эффективность конверсии энергии МБФП составила 92%. При установке в оптическую схему МБФП с разницей фаз  $\pi$  в результате абляции под действием ДОП были получены отпечатки одинакового размера в форме круга на образце полированной нержавеющей стали (рис. 2).



**Рис. 2.** Результаты тестирования МБФП: экспериментальная установка, зарегистрированные на ПЗС камере распределения интенсивности, микрофотография абляции полированной стали

### Заключение

Определены оптимальные параметры записи МБФП технологией ЛИМП, позволяющие достичь заданную глубину травления на плавленом кварце, необходимую для их функционирования. При тестировании изготовленных МБФП с разницей фазы  $\pi$  и  $\pi/2$  было установлено, что с их применением осуществляется генерация суперпозиции ОВП в форме ДОП, окружающих область нулевой интенсивности. Были получены отпечатки на образце полированной стали при использовании МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi$ . Отпечатки по форме близки к кругу и обладают одинаковыми размерами. Результаты одновременной обработки стального образца демонстрируют реальные перспективы применения МБФП как для лазерной обработки металлов, так и для лазерной обработки других материалов.

### Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом [проект № 20-71-10103].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhou, L.** et al. Directly writing binary multi-sector phase plates on fused silica using femtosecond laser / L. Zhou et al. // High Power Laser Science and Engineering. — 2018. Vol. 6. — N. e6. — P. 1-5.
- [2] **Khonina, S. N., Volotovskiy, S. G.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S. N. Khonina, S. G. Volotovskiy // Journal of the Optical Society of America A. — 2010. Vol. 27. — N. 10. — P. 2188-2197.
- [3] **Veiko, V. P.** Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media / V. P. Veiko et al. Quantum Electronics. — 2017. Vol. 47. — N. 9. — P. 842-848.

## Generation of scalar vortex beams superposition using multisector binary phase plates

*V. A. Shkuratova, G. K. Kostyuk, A. A. Petrov*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The research describes the application results of multisector binary phase plates fabricated on fused silica to generate the optical vortex beams superposition. Laser-induced microplasma was used as a spot tool for etching sectors which provides the required phase shifts  $-\pi$  and  $\pi/2$  relative to non-etched sectors. Etched sectors were controlled by contact profilometry with vertical resolution  $\pm 10$  nm and diffraction-interference contrast optical microscopy. The quality of generated superposition states was evaluated with CCD camera. Measured efficiency of Gaussian beam conversion equaled to 92%. One of plates was used in an optical setup with the nanosecond laser (the wavelength of 1060 nm) for simultaneous processing of polished steel.

*Keywords:* Vortex beams, Multisector binary phase plates, Laser-induced microplasma.

# Дифракционная эффективность пилообразных двухрельфных микроструктур в рамках электромагнитной теории дифракции

Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Одной из общих задач голографии и дифракционной оптики является достоверный расчет дифракционной эффективности (ДЭ) микроструктуры. Наиболее достоверную оценку ДЭ в случае пилообразных рельефно-фазовых микроструктур с относительно низким (меньше двадцати) значением отношения периода дифракционной микроструктуры к высоте рельефа позволяет получить метод, основанный на решении системы уравнений Максвелла, в частности, строгим анализом связанных волн (RCWA). Оценить предельно достижимую ДЭ рельефно-фазовой микроструктуры RCWA-методом позволяет использование предложенной в докладе математической модели материала просветляющего покрытия плоских и рельефных рабочих поверхностей микроструктуры.

Установлена причина осциллирующего характера зависимости ДЭ от угла падения излучения на пилообразную микроструктуру с двумя внутренними рельефами. Показано, что минимизировать негативное влияние осцилляций на оценку предельно допустимого угла падения излучения и на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой, можно только путем увеличения отношения периода дифракционной микроструктуры к эффективной глубине рельефа.

*Ключевые слова:* Пилообразная рельефно-фазовая микроструктура, Дифракционная эффективность, RCWA-метод расчета дифракционной эффективности

*Цитирование:* Грейсух, Г. И. Дифракционная эффективность пилообразных двухрельфных микроструктур в рамках электромагнитной теории дифракции / Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 92–98.

## Введение

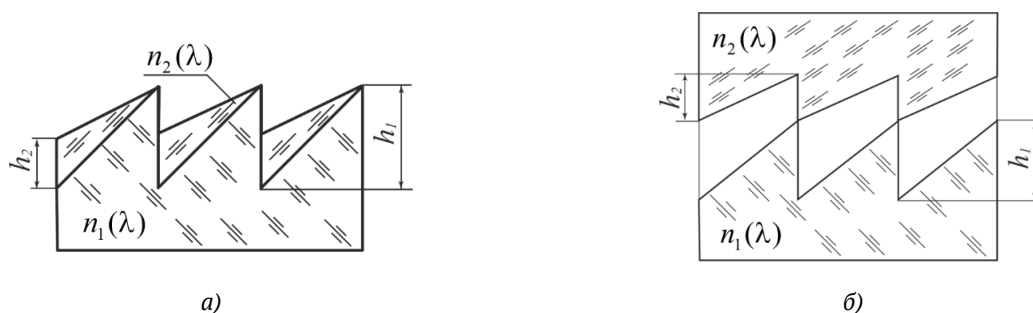
Одной из общих задач голографии и дифракционной оптики является достоверный расчет дифракционной эффективности (ДЭ) микроструктуры и анализ зависимости ДЭ от целого ряда конструктивных и технологических параметров. Наиболее просто и с наименьшими затратами машинного времени рассчитывать ДЭ позволяет скалярная теория дифракции (СТД). При решении ряда задач наблюдается хорошее совпадение результатов, даваемых СТД и электромагнитной теорией дифракции (ЭТД). Однако в случае рельефно-фазовых микроструктур с относительно низким (меньше двадцати) значением отношения периода дифракционной микроструктуры к высоте рельефа результаты, получаемые в рамках СТД, значительно отличаются от результатов, даваемые ЭТД [1-3]. В таких случаях достоверность результатов может быть гарантирована только путем решения системы уравнений Максвелла.

Существует несколько методов решения указанной системы, и одним из наиболее распространенных является строгий анализ связанных волн (Rigorous coupled-wave analysis,

RCWA) [4-6]. Данный метод основан на решении уравнений Максвелла при определенных граничных условиях, и определение ДЭ какого-либо порядка сводится к решению системы граничных условий относительно амплитуды этого порядка.

### Результаты исследования

Практически безальтернативным RCWA-метод оказывается при расчете ДЭ двухрельфных пилообразных микроструктур (см. рис. 1), используемых в дифракционной оптике для подавления зависимости ДЭ микроструктуры, а следовательно, и дифракционного элемента от длины волны и угла падения излучения. При анализе в рамках ЭТД микроструктуры, компонуемые по схемам (а) и (б), представленные на рис. 1 и различающиеся эффективной глубиной рельефов ( $h_{eff}=h_1$  у микроструктур с внутренним и наружным рельефами и  $h_{eff}=h_1+h_2$  у микроструктур с двумя внутренними рельефами), дают разные значения ДЭ, особенно при наклонном падении излучения. Несовпадение кривых зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуры по схемам (а) и (б) наиболее ощутимо при значениях относительного пространственного периода микроструктуры  $P = \Lambda/h_{eff} < 20$  [7].



**Рис. 1** Двухслойные пилообразные дифракционные микроструктуры с одним (а) и двумя (б) внутренними рельефами

В этом случае кроме снижения ДЭ микроструктуры по схеме (б) из-за больших френелевских потерь наблюдается значительная осцилляция кривых зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру. Очевидно, что осцилляции, во-первых, препятствуют достоверной оценке предельно допустимого угла падения излучения на микроструктуру, а во-вторых, снижают качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой.

С целью выяснения причин осцилляций, уменьшения и даже исключения влияния френелевских потерь на ДЭ при расчете моделировались просветляющие покрытия на рабочих поверхностях микроструктуры, как это показано на рис. 2.

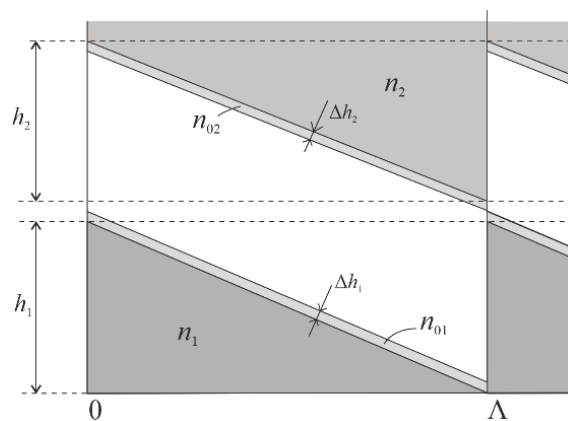


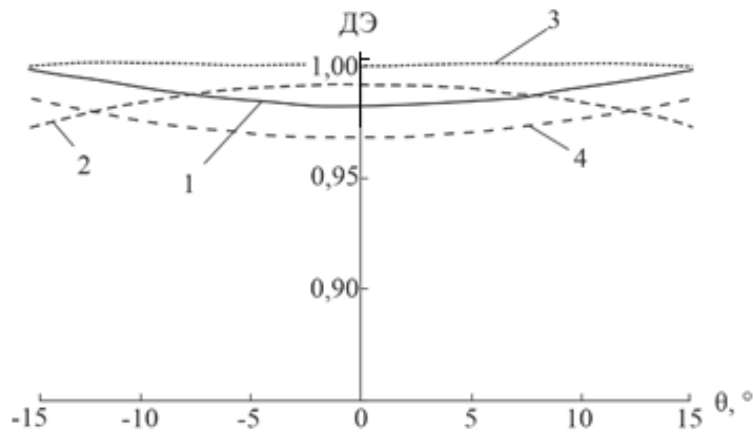
Рис. 2. Двухслойная двух-рельфная микроструктура с нанесенными на рельефы покрытиями

Пространство между рельефами в материалах микроструктуры с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  заполнено воздухом, а острые вершины рельефов соприкасаются покрытиями с толщинами  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  и показателями преломления  $n_{01}$  и  $n_{02}$  соответственно.

Расчеты выполнялись, в частности, для микроструктуры с нижним слоем из кроноподобного оптического пластика E48R ( $n_d = 1,531160$ ;  $v_d = 56,0438$ ), включенного в каталог ZEON программы оптического проектирования ZEMAX [8], и верхним слоем из флинтоподобного оптического пластика EP7000 ( $n_d = 1,651006$ ;  $v_d = 21,4946$ ), выпускаемого фирмой MITSUBISHI GAS CHEMICAL под торговой маркой Lupizeta™ EP7000 [9].

При расчетах RCWA-методом предполагалось, что излучение падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления  $n_1$ , угол падения  $\theta$  отсчитывается от нормали к подложке, а дифрагированное излучение остается в среде с показателем преломления  $n_2$ . Глубины рельефов принимались равными  $h_1 = 8,792$  мкм,  $h_2 = 6,246$  мкм, что в скалярном приближении на длине волны  $\lambda = 0,6$  мкм обеспечивало ДЭ практически равную единице в интервале углов падения излучения  $\pm 15^\circ$  (см. рис. 3).

Для просветляющего покрытия использовался реальный материал  $\text{MgF}_2\text{-E}$  ( $n_d = 1,389557$ ;  $v_d = 104,8574$ ) или математическая модель материала, полностью исключая отражение при нормальном падении излучения любой длины волны в пределах рабочего спектрального диапазона ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$  мкм).



**Рис. 3.** Зависимости ДЭ исследуемой двухрельефной пилообразной микроструктуры от угла падения излучения  $\theta$  для ряда длин волн, полученные в рамках СТД: 1 —  $\lambda = 0,4$  мкм; 2 —  $\lambda = 0,5$  мкм; 3 —  $\lambda = 0,6$  мкм; 4 —  $\lambda = 0,7$  мкм

В случае реального материала толщины покрытий  $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 0,091635$  мкм, а показатели преломления  $n_{01} = n_{02}$ . Такое покрытие обеспечивало снижение коэффициента френелевского отражения пластика E48R при нормальном падении излучения из воздуха на длине волны  $\lambda = 0,51$  мкм до 1,3% и до 1,9% на краях рабочего спектрального диапазона, а пластика EP7000 — до 0,6% на длине волны  $\lambda = 0,51$  мкм и до 1,6% на краях рабочего спектрального диапазона.

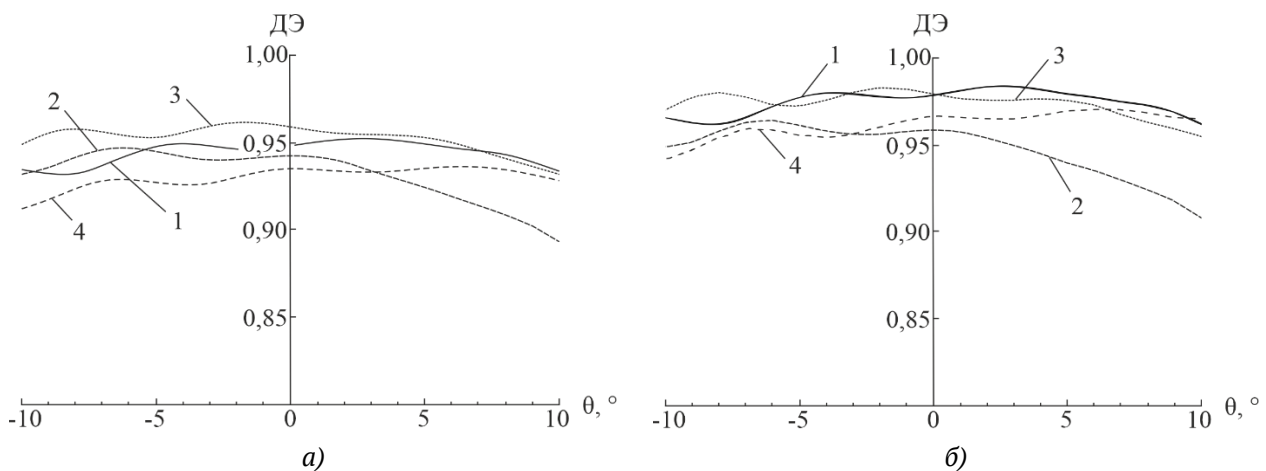
В случае математической модели материала покрытия его параметры для каждой длины волны вычислялись по формулам

$$n_{0i} = \sqrt{n_i},$$

$$\Delta h_i = 0.25\lambda/n_{0i},$$

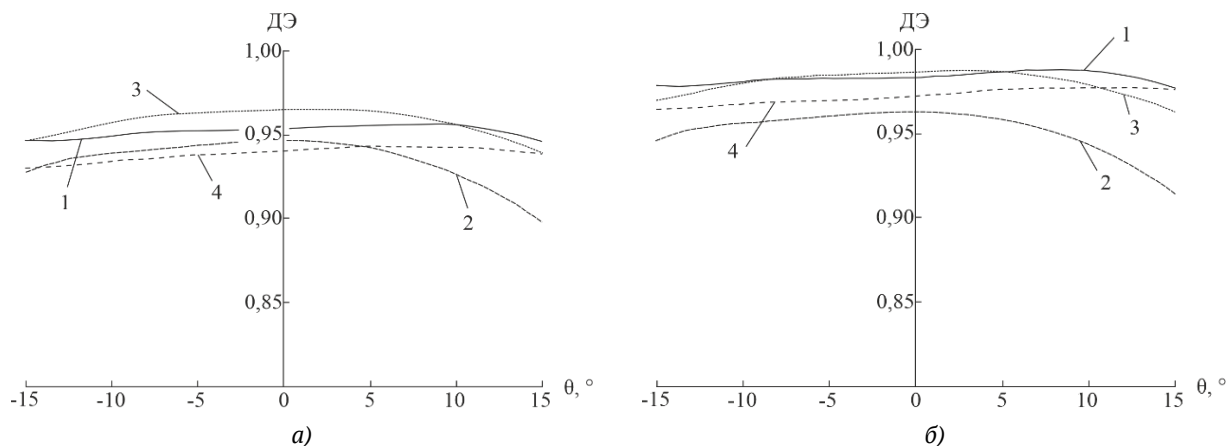
где  $i = 1, 2$ .

На рис. 4 и 5 представлены кривые зависимости ДЭ от угла падения излучения, полученные RCWA-методом с использованием разработанной авторами компьютерной программы «RCWA-PSUACE».





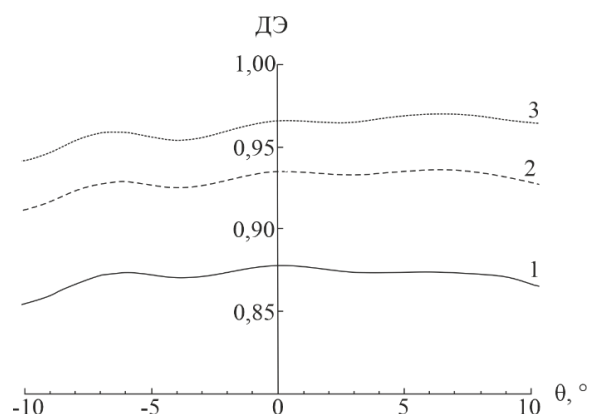
**Рис. 4.** Зависимости ДЭ от угла падения излучения для ряда длин волн при  $P=10$ : а) – с просветляющими покрытиями из  $MgF_2-E$ , (б) – с модельными покрытиями, исключающими отражения; 1 –  $\lambda=0,4$  мкм; 2 –  $\lambda=0,5$  мкм; 3 –  $\lambda=0,6$  мкм; 4 –  $\lambda=0,7$  мкм



**Рис. 5.** Зависимости ДЭ от угла падения излучения для ряда длин волн при  $P=30$ : (а) – с просветляющими покрытиями из  $MgF_2-E$ , (б) – с модельными покрытиями, исключающими отражения; 1 –  $\lambda=0,4$  мкм; 2 –  $\lambda=0,5$  мкм; 3 –  $\lambda=0,6$  мкм; 4 –  $\lambda=0,7$  мкм

Результаты расчетов, представленные на рис. 4 и 5, позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Осциллирующий характер зависимостей ДЭ от угла падения излучения не связан с френелевским отражением излучения от плоских или рельефных рабочих поверхностей микроструктуры и при уменьшении или полном подавлении отражений эти зависимости сохраняют подобие. Еще более наглядно это подтверждается кривыми рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимости ДЭ от угла падения излучения на длине волны  $\lambda=0,7$  мкм при  $P=10$ : 1 – без просветляющих покрытий; 2 – с покрытиями из  $MgF_2-E$ ; 3 – с модельными покрытиями

- 2) Амплитуда осцилляций целиком определяется величиной относительного пространственного периода микроструктуры, в частности, в видимом спектральном диапазоне осцилляции значительны при  $P \leq 10$  и практически отсутствуют при  $P \geq 30$ .

- 3) В отсутствии френелевских потерь и при  $P \geq 30$  зависимости ДЭ от угла падения излучения, получаемые в рамках ЭТД, отличаются от соответствующих зависимостей, даваемых СТД, в основном незначительным снижением общего уровня и нарушением симметрии (сопоставьте рис. 5б и рис. 3).

### **Заключение**

При расчете ДЭ пилообразных рельефно-фазовых микроструктур в рамках ЭТД использование предложенной в докладе математической модели материала просветляющего покрытия плоских и рельефных рабочих поверхностей микроструктур позволяет полностью исключить отражения при нормальном падении излучения любой длины волны в пределах рабочего спектрального диапазона. Это дает возможность оценить предельно достижимую ДЭ исследуемой микроструктуры.

Осциллирующий характер зависимости ДЭ от угла падения излучения на пилообразную микроструктуру с двумя внутренними рельефами не связан с френелевским отражением излучения от плоских или рельефных рабочих поверхностей микроструктуры. Минимизировать негативное влияние осцилляций на оценку предельно допустимого угла падения излучения и на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой можно только путем увеличения отношения периода дифракционной микроструктуры к эффективной глубине рельефа.

### **Благодарность**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

### **Список источников**

- [1] Greisukh G. I. et al. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // *Optics Communications*. – 2015. – Т. 338. – С. 54-57.
- [2] Greisukh G. I. et al. Spectral and angular dependences of the efficiency of diffraction lenses with a dual-relief and two-layer microstructure // *Journal of Optical Technology*. – 2015. – Т. 82. – №. 5. – С. 308-311.
- [3] Greisukh G. I. et al. Spectral and angular dependences of the efficiency of relief-phase diffractive lenses with two- and three-layer microstructures // *Optics and Spectroscopy*. – 2015. – Т. 118. – №. 6. – С. 964-970.
- [4] Moharam M. G., Gaylord T. K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // *JOSA*. – 1981. – Т. 71. – №. 7. – С. 811-818.
- [5] Moharam M. G., Gaylord T. K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings // *JOSA*. – 1982. – Т. 72. – №. 10. – С. 1385-1392.
- [6] Moharam M. G. et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach // *JOSA A*. – 1995. – Т. 12. – №. 5. – С. 1077-1086.
- [7] Greisukh G. I. et al. Limiting spectral and angular characteristics of sawtooth dual-relief two-layer diffraction microstructures // *Quantum Electronics*. – 2021. – Т. 51. – №. 2. – С. 184.
- [8] Zemax [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zemax.com/products/opticstudio>
- [9] MITSUBISHI GAS CHEMICAL [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.mgc.co.jp/eng/products/kc/iupizeta\\_ep.html](http://www.mgc.co.jp/eng/products/kc/iupizeta_ep.html).

# Diffraction efficiency of sawtooth two relief microstructures in the framework of electromagnetic diffraction theory

*G. I. Greisukh, A. I. Antonov, E. G. Ezhov*

Penza State University of Architecture and Construction Penza, Russia

One of the common tasks of holography and diffractive optics is the reliable calculation of the diffraction efficiency (DE) of the microstructure. The most reliable estimate of the DE in the case of sawtooth relief-phase microstructures with a relatively low (less than twenty) value of the ratio of the period of the diffractive microstructure to the height of the relief can be obtained by a method based on the solution of the system of Maxwell equations and, in particular, a rigorous analysis of coupled waves (RCWA). The maximum achievable DE of a relief-phase microstructure by the RCWA method can be estimated using the mathematical model of the material of the antireflection coating of flat and relief working surfaces of the microstructure proposed in the report. The reason of the oscillating nature of the DE dependence on the angle of incidence of radiation on a sawtooth microstructure with two internal reliefs is established. It is shown that the negative effect of oscillations on the estimation of the maximum permissible angle of incidence of radiation and on the quality of the image formed by a refractive-diffractive optical system can be minimized only by increasing the ratio of the period of the diffractive microstructure to the effective depth of the relief.

*Keywords:* Sawtooth relief-phase microstructure, Diffraction efficiency, RCWA

# Анализ встраиваемых 2D дифракционных сенсорных элементов для контроля долговременной нестабильности систем лазерной записи ДОЭ

*Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, Р. И. Куц*

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе обсуждается использование специализированных 2D дифракционных сенсорных элементов (2D-ДСЭ), встраиваемых в рабочее поле дифракционных оптических элементов (ДОЭ), для контроля долговременной нестабильности процесса их сканирующей лазерной записи. Эти сенсоры состоят из двух частей: первая записывается до начала записи ДОЭ, а вторая во время записи с заданным смещением относительно первой. Изменение скважности, а также изменение смещения между составными частями такого сенсора от заданных значений, при освещении 2D-ДСЭ сфокусированным пробным световым пучком приводят к изменению дифракционной эффективности в дифракционных порядках. Показана эффективность использования данных встраиваемых 2D-ДСЭ для оценки методом оптической дифрактометрии ошибок координат формируемых дифракционных зон и скважности структур при лазерной записи ДОЭ.

*Ключевые слова:* Дифракционные оптические элементы, Сканирующая лазерная запись, Дифракционные сенсорные элементы, Дифракционная эффективность.

*Цитирование:* Белоусов, Д. А. Анализ встраиваемых 2D дифракционных сенсорных элементов для контроля долговременной нестабильности систем лазерной записи ДОЭ / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, Р. И. Куц // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 99–104.

## Введение

При изготовлении дифракционных оптических элементов (ДОЭ) методами сканирующей лазерной записи характерна большая длительность производственного процесса. В связи с этим актуальной задачей, как для систем с X-Y линейной траекторией движения пучка [1], так и для круговых лазерных записывающих систем [2] является регистрация долговременной нестабильности координат формируемых на подложке дифракционных зон, а также скважности записываемых структур. Данные об этих ошибках могут использоваться как доказательство качества (сертификации) изготовленного ДОЭ, либо для учета соответствующих ошибок при обработке интерферограмм в системах оптического контроля асферических поверхностей с использованием опорного волнового фронта генерируемого ДОЭ.

Типичным решением для контроля таких ошибок является введение в записываемую структуру различных меток, выполняющих роль своеобразных сенсоров [3-5]. В данной работе рассматривается использование встраиваемых 2D дифракционных сенсорных элементов (2D-ДСЭ), для контроля стабильности координат формируемых дифракционных зон, а также их скважности при записи ДОЭ.

## 1. 2D дифракционные сенсорные элементы

Встраиваемые 2D-ДСЭ для контроля стабильности систем лазерной записи ДОЭ были впервые предложены в работе [6]. Структуру такого сенсора составляют две 2D дифракционные структуры, каждая из которых формируется в процессе записи независимо: первая записывается до начала записи ДОЭ, а вторая во время записи с заданным смещением относительно первой структуры. На рис. 1а показано схематичное расположение двух 2D структур, формирующих 2D-ДСЭ, каждая из которых отмечена разными оттенками серого. Контроль стабильности процесса записи ДОЭ с использованием 2D-ДСЭ осуществляется путём анализа дифракционной эффективности (ДЭ) соответствующих дифракционных порядков.

На рис. 1б показана геометрия моделирования ДЭ таких 2D-ДСЭ, используемая в данной работе. Моделирование ДЭ производилось для амплитудных 2D решёток с периодом  $d = 5$  мкм каждая, и высотой формируемых на кварцевой подложке хромовых выступов (для «положительного» процесса записи) или впадин (для «негативного» процесса записи) 50 нм. Ширина  $W$  отдельных составных элементов структуры при моделировании варьировалась в диапазоне от 0,8 мкм до 1,5 мкм. Это соответствует изменению скважности 2D-ДСЭ ( $D = d/W$ ) в диапазоне от 3,33 до 6,25.

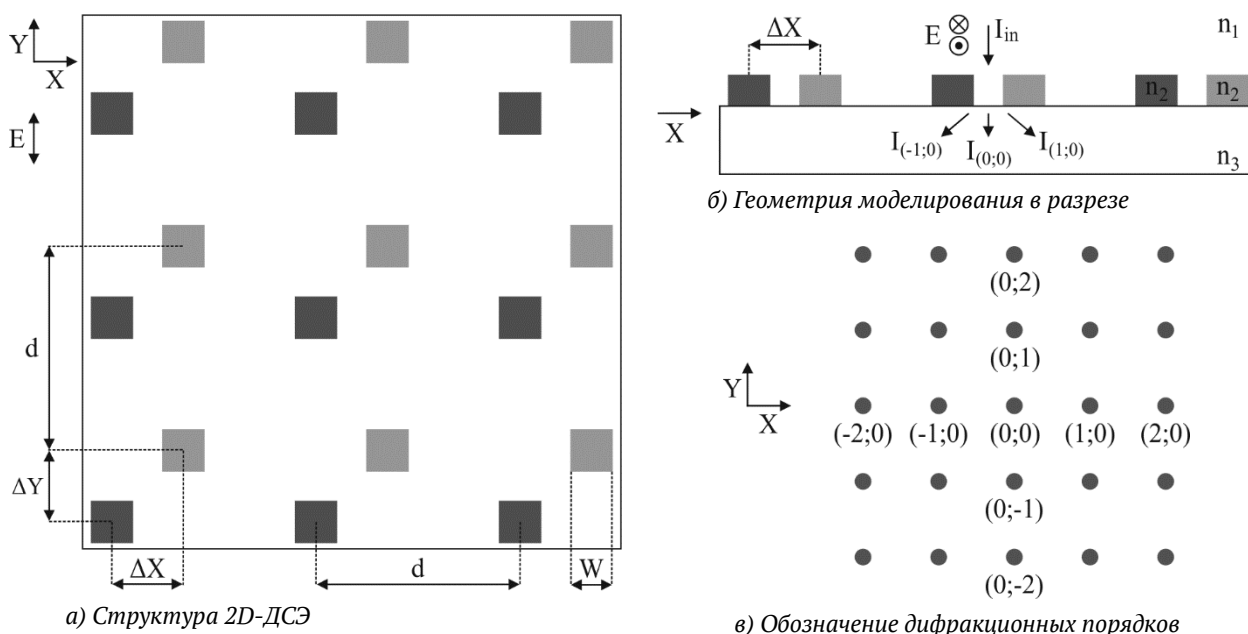


Рис. 1. Геометрия моделирования 2D дифракционных сенсорных элементов

## 2. Контроль нестабильности координаты записываемых структур

В работе [6] было показано, что совместный анализ ДЭ дифракционных порядков (1;0) и (2;0) позволяет осуществлять контроль ошибок долговременной нестабильности координаты записываемого пучка вдоль оси X, а анализ ДЭ дифракционных порядков (0;1) и (0;2) вдоль оси Y соответственно (рис. 1в). Для определения величины смещения координаты вдоль осей X и Y были введены следующие параметры:

$$\Delta DE_{x12} = \frac{(\Delta DE_{(1;0)} - \Delta DE_{(2;0)})}{(\Delta DE_{(1;0)} + \Delta DE_{(2;0)})},$$

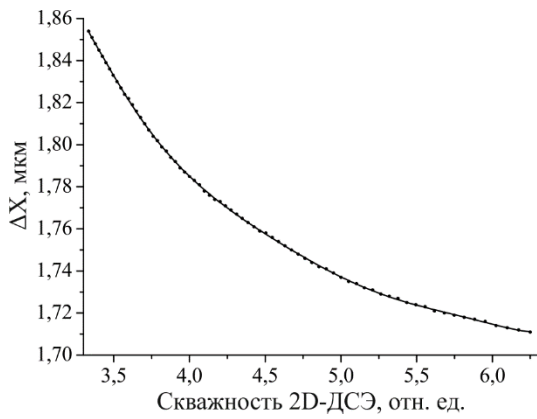
$$\Delta DE_{y12} = \frac{(\Delta DE_{(0;1)} - \Delta DE_{(0;2)})}{(\Delta DE_{(0;1)} + \Delta DE_{(0;2)})},$$

где  $DE_{(i;j)}$  – дифракционная эффективность соответствующего дифракционного порядка с индексами  $(i;j)$ . Изначально при записи 2D-ДСЭ задаётся такое смещение между центром второй 2D решётки относительно первой, при котором достигается равновесная дифракционная эффективность первых порядков дифракции, то есть выполняются условия  $\Delta DE_{x12} \approx 0$  и  $\Delta DE_{y12} \approx 0$ . Величина нестабильности координаты в процессе записи определяется по отклонению вышеописанных параметров от 0.

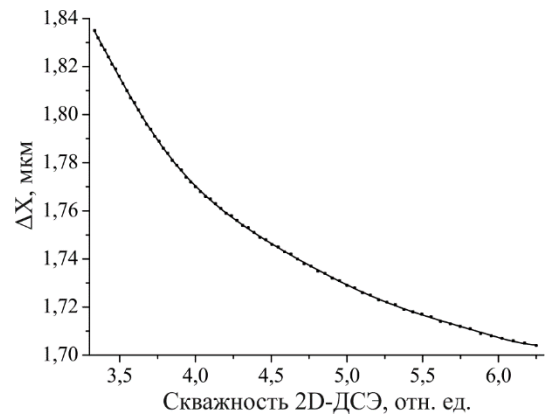
### 3. Контроль скважности записываемых структур

Параметры  $\Delta DE_{x12}$  и  $\Delta DE_{y12}$  зависят не только от смещения центров двух 2D решёток, формирующих структуру 2D-ДСЭ друг относительно друга, но и от скважности ( $D = d/W$ ) записываемых структур. Это связано с тем, что при изменении скважности структур смещается координата точки равновесной дифракционной эффективности (рис. 2), что приводит к соответствующей ошибке полученных результатов при контроле долговременной нестабильности координаты записываемых дифракционных зон по параметрам  $\Delta DE_{x12}$  и  $\Delta DE_{y12}$ .

Важно отметить, что при постоянной скважности структур во всём диапазоне возможных смещений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$ , изменение ДЭ 0-го дифракционного порядка  $(0;0)$  практически не наблюдается (рис. 3). В свою очередь изменение скважности структур приводит к заметному изменению ДЭ 0-го порядка дифракции (рис. 4). Это позволяет использовать измерение ДЭ 0-го дифракционного порядка для контроля нестабильности скважности записываемых структур. Определив отклонение скважности от заданных значений, можно определить соответствующее смещение координаты точки равновесной дифракционной эффективности, и учесть его при оценке нестабильности координат по параметрам  $\Delta DE_{x12}$  и  $\Delta DE_{y12}$ . Таким образом, совместное измерение параметров  $\Delta DE_{x12}$  и  $\Delta DE_{y12}$  и дифракционной эффективности 0-го порядка дифракции позволяет осуществлять контроль, как нестабильности координат дифракционных зон, так и скважности структур, возникающих в процессе сканирующей лазерной записи ДОЭ.

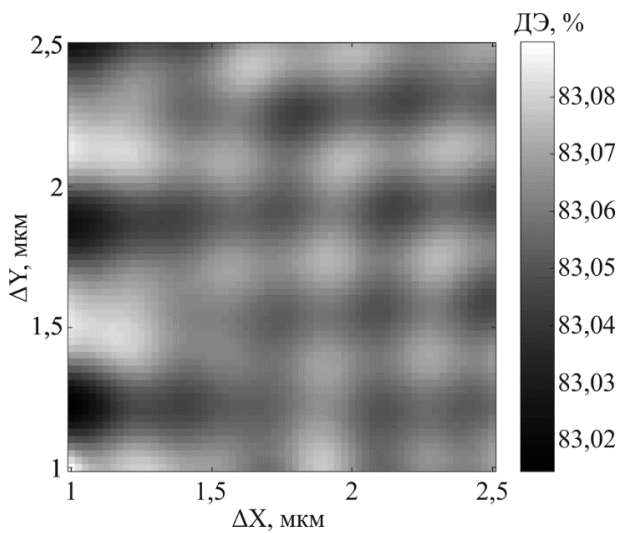


а) Для «положительной» структуры

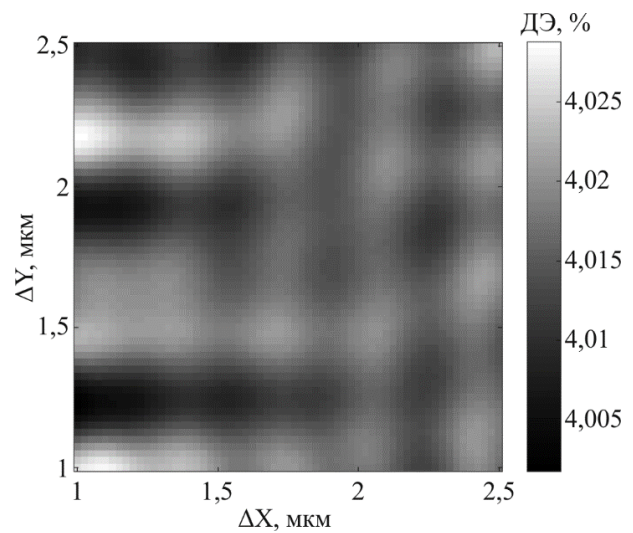


б) Для «отрицательной» структуры

**Рис. 2.** Смещение координаты точки равновесной дифракционной эффективности ( $\Delta DEX_{12} \approx 0$ ) вдоль оси X в зависимости от скважности структур, формирующих 2D-ДСЭ

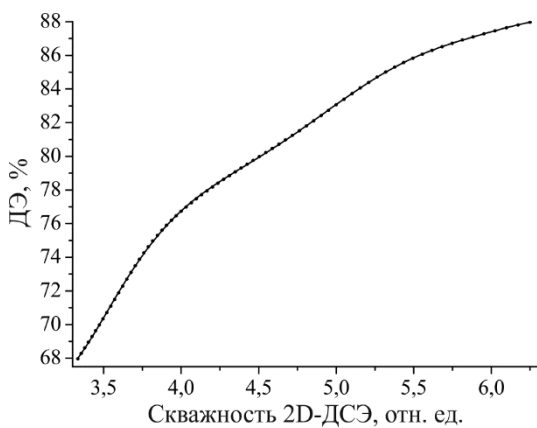


а) Для «положительной» структуры

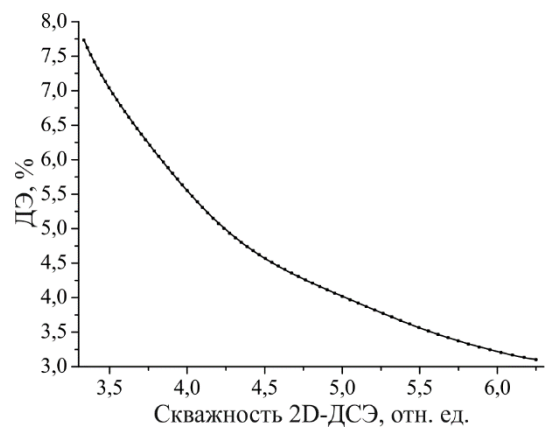


б) Для «отрицательной» структуры

**Рис. 3.** Зависимость дифракционной эффективности 0-го дифракционного порядка от смещений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  при постоянной скважности ( $D=5$ ) структуры 2D-ДСЭ



а) Для «положительной» структуры



б) Для «отрицательной» структуры

**Рис. 4.** Дифракционная эффективность 0-го дифракционного порядка в зависимости от скважности структур 2D-ДСЭ

## Заключение

Полученные результаты исследования показывают, что использование встраиваемых 2D-ДСЭ позволяет осуществлять контроль долговременной нестабильности координат формируемых дифракционных зон, а также их скважности при сканирующей лазерной записи ДОЭ. Для этого необходимым и достаточным является измерение дифракционной эффективности 5 дифракционных порядков. Совместный анализ ДЭ дифракционных порядков (1;0) и (2;0) позволяет осуществлять контроль ошибок долговременной нестабильности координаты записываемого пучка вдоль оси X (параметр  $\Delta DE_{X12}$ ), а анализ ДЭ дифракционных порядков (0;1) и (0;2) вдоль оси Y (параметр  $\Delta DE_{Y12}$ ) соответственно. А измерение ДЭ 0-го дифракционного порядка позволяет осуществлять контроль скважности записываемых структур. Контроль скважности позволяет определить смещение точки равновесной дифракционной эффективности между первыми порядками дифракции и внести соответствующую корректировку при анализе параметров  $\Delta DE_{X12}$  и  $\Delta DE_{Y12}$ , для минимизации ошибок оценки долговременной нестабильности координат записываемых дифракционных зон ДОЭ.

## Благодарность

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос. регистрации 121041500060-2).

## Список источников

- [1] **Rensch, C.** Laser scanner for direct writing lithography / C. Rensch, S. Hell, M. V. Schickfus, S. Hunklinger // *Applied Optics*. — 1989. — Vol 28. — № 17. — P. 3754–3758.
- [2] **Koronkevich, V. P.** Fabrication of kinoform optical elements / V. P. Koronkevich, V. P. Kiriynov, V. P. Kokoulin, A. G. Poleschuk // *Optik*. — 1984. — Vol 67. — № 3. — P. 257–266.
- [3] **Rhee, H. G.** Diffractive Optics Fabrication System for Large Aspheric Surface Testing / H. G. Rhee, J. B. Song, D. I. Kim, Y. W. Lee // *Journal of the Korean Physical Society*. — 2007. — Vol 50. — № 4. — P. 1032–1036.
- [4] **Shimanskii, R. V.** Alignment of the writing beam with the diffractive structure rotation axis in synthesis of diffractive optical elements in a polar coordinate system / R. V. Shimanskii, A. G. Poleschuk, V. P. Korolkov, V. V. Cherkashin // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. — 2017. — Vol 53. — № 2. — P. 123–130.
- [5] **Poleshchuk, A. G.** Fabrication and certification of high-quality and large-aperture CGHs for optical testing / A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov // *Optical Fabrication and Testing*. Optical Society of America. — 2006. — P. 20–23.
- [6] **Shimansky, R. V.** Diffractive Sensor Elements for Registration of Long-Term Instability at Writing of Computer-Generated Holograms / R. V. Shimansky, D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. I. Kuts // *Sensors*. — 2021. — Vol 21. — № 19. — P. 6635.



# **Analysis of built-in 2D diffractive sensor elements for monitoring long-term instability of laser writing systems for DOEs**

*D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. V. Shimansky, R. I. Kuts*

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper the use of specialized 2D diffractive sensor elements (2D-DSE) built-in the working field of diffractive optical elements (DOE) to control the long-term instability of the process of their scanning laser writing are discussed. These sensors consist of two parts: the first one written before the start of DOE writing, and the second one during writing with a given offset relative to the first one. A change in the duty cycle and a change in the offset between the centers of the two components of the sensor from a given values, when illuminating the 2D-DSE with a focused probe light beam, lead to a change in the diffraction efficiency in diffraction orders. The effectiveness of using from built-in 2D-DSEs for estimating coordinate errors formed diffraction zones and the duty cycle of structures during laser writing of DOEs by optical diffractometry is shown.

*Keywords:* Diffractive optical elements, Scanning laser writing, Diffractive sensor elements, Diffraction efficiency.

# Исследование дифракционных характеристик и фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур в кристалле танталата лития на основе методов Брэгговской дифракции

Е. Н. Савченков<sup>1</sup>, Н. И. Буримов<sup>1</sup>, С. М. Шандаров<sup>1</sup>, А. Р. Ахматханов<sup>2</sup>, М. А. Чувакова<sup>2</sup>,  
В. Я. Шур<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

Представлены результаты исследования методом дифракции Брэгга характеристик регулярных доменных структур (РДС), создаваемых в сегнетоэлектрических кристаллах  $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$  переключением поляризации под действием внешнего пространственно-периодического поля. Для РДС в кристалле  $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ , имеющей ненаклонные доменные стенки, по релаксации эффективности дифракции Брэгга в приложенном постоянном электрическом поле исследована ее эффективная фотоиндуцированная проводимость для длины волны 657 нм. Установлено, что для данной РДС зависимость проводимости от интенсивности индуцирующего излучения имеет сублинейный характер.

*Ключевые слова:* Регулярные доменные структуры, Дифракция Брэгга, Танталат лития, Доменные стенки, Фотоиндуцированная проводимость.

*Цитирование:* Савченков, Е. Н. Исследование дифракционных характеристик и фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур в кристалле танталата лития на основе методов Брэгговской дифракции / Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова, В. Я. Шур // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 105–113.

## Введение

Технологии доменной инженерии [1–4] предоставляют широкие возможности для создания в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата и танталата лития РДС, эффективно используемых в устройствах для квазисинхронного преобразования спектра лазерного излучения и электрооптической модуляции, его временных и пространственных характеристик [4–10]. Для этих приложений требуется обеспечить высокую воспроизводимость параметров доменных структур по всему рабочему объему в кристалле [3]. Реальные РДС имеют случайные отклонения по размерам доменов и положению стенок, при этом последние могут иметь наклон к полярной оси, который в кристаллах ниобата лития может превышать  $0,2^\circ$  [11–15]. Эффективным методом неразрушающего контроля РДС является линейная дифракция света на создаваемых ими возмущениях оптических свойств, которая для структур, сформированных в кристаллах ниобата лития, изучалась в [5–9, 14–23]. С использованием изотропной дифракции Брэгга на РДС в кристалле  $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  со стенками, наклоненными к полярной оси на угол  $\alpha = \pm 0,31^\circ$ , была обнаружена значительная

проводимость таких структур, фотоиндуцированная лазерным излучением с длинами волн от 457 до 657 нм [22, 24].

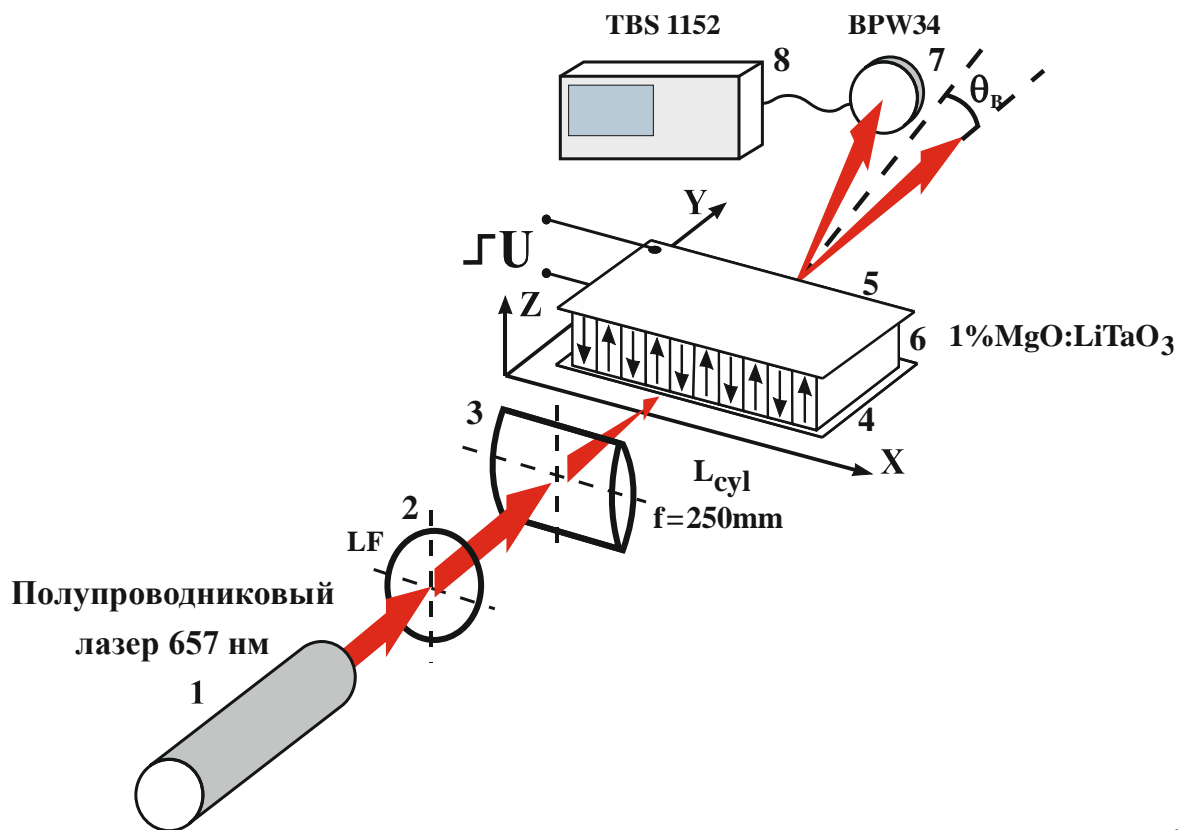
Для излучения полупроводникового лазера с длиной волны  $\lambda = 657$  нм в [24] получено, что при используемой в экспериментах максимальной интенсивности лазерного пучка  $I_0 = 160$  мВт/мм<sup>2</sup> усредненная по периоду РДС эффективная проводимость кристалла 5%MgO:LiNbO<sub>3</sub> может быть оценена как  $\sigma_{\text{eff}} = 3,44 \cdot 10^{-9}$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>. Она была почти на порядок меньше, чем для  $\lambda = 457$  нм [24], но превосходила известную величину темновой проводимости данного кристалла в монодоменном состоянии,  $\sigma_d \leq 1,9 \cdot 10^{-15}$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup> [25], более чем на четыре порядка. Такая фотоиндуцированная проводимость, имеющая спектральную зависимость, может влиять на характеристики электрооптических устройств управления лазерным излучением с использованием РДС с наклонными стенками в сегнетоэлектрических кристаллах. Следует также отметить, что до настоящего времени возможность фотоиндуцированной проводимости для РДС с ненаклонными стенками не обсуждалась.

В настоящем сообщении с использованием подходов и данных по изотропной дифракции Брэгга на РДС с ненаклонными стенками в кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub>, описанных ранее в [26], представлены результаты экспериментальных исследований зависимости ее проводимости, фотоиндуцированной зондирующим лазерным пучком с длиной волны  $\lambda = 657$  нм и интенсивностью от 0,35 до 27 мВт/мм<sup>2</sup>.

### Методика эксперимента и результаты

Для регистрации зависимости от времени эффективности электрооптической дифракции Брэгга первого порядка использовалась подобная описанной в [22] экспериментальная установка, схематично изображенная на рис. 1. В ней применялся полупроводниковый лазерный диод 1, излучающий зондирующий световой пучок с длиной волны  $\lambda = 657$  нм и выходной мощностью 15 мВт. Постоянное внешнее электрическое напряжение  $U_0 = 200$  В, положительной или отрицательной полярности, с помощью механически прижимаемых к  $Z$ -граням медных электродов 4 и 5 прикладывалось к образцу 6 с РДС, имеющей пространственный период  $\Lambda = 7,99$  мкм и размеры  $2 \times 1$  мм<sup>2</sup> вдоль осей  $Y$  и  $Z$ , соответственно. Для подачи напряжения на внешние медные электроды, реализуемого через резистор с  $R = 1$  кОм, использовался тумблер.

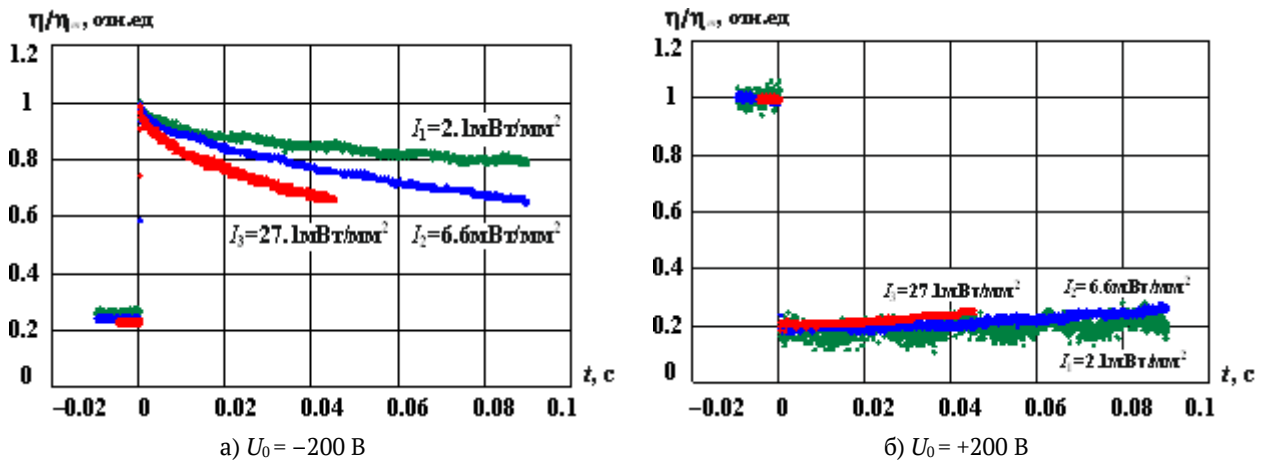
Пучок света от полупроводникового лазера 1, поляризованный вдоль оси  $Z$  кристалла, ослабляемый до нужных мощностей сменными светофильтрами 2, фокусировался цилиндрической линзой 3 с фокусным расстоянием 250 мм примерно в середину входной грани ( $y = 0$ ) образца 6. Перетяжка пучка в фокальной плоскости имела эллиптическую форму с гауссовым распределением интенсивности и площадью  $\sim 0,42$  мм<sup>2</sup>. Наблюдаемая в отсутствие внешнего электрического поля и измеряемая с помощью фотодиода 7 и осциллографа 8 эффективность дифракции Брэгга на доменных стенках РДС составляла величину  $\eta_{dw} \approx 0,01$ .



1 – полупроводниковый лазер, 2 – сменный светофильтр, 3 – положительная цилиндрическая линза, 4 и 5 – медные электроды, 6 – кристалл танталата лития с РДС, 7 – pin-фотодиод, 8 – осциллограф

**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки

После включения внешнего напряжения  $U_0 = 200$  В мощность дифрагированного луча  $P(t)$ , регистрируемая цифровым осциллографом TBS 1152, быстро изменялась за время около 25 нс, причем при включении отрицательного напряжения эффективность дифракции возрастала до максимальной величины, а при включении положительного напряжения уменьшалась до минимального значения. Затем происходила медленная релаксация дифракционной эффективности  $\eta(t)$  к начальной величине  $\eta_{dv}$ , со скоростью, которая возрастала с интенсивностью зондирующего пучка  $I_0$ . Типичные зависимости для нормированных дифракционных эффективностей  $\eta_{\mp}(t)/\eta_m$  для значений приложенного напряжения  $U_0 = +200$  В и  $-200$  В представлены на рис. 2а и 2б соответственно. Отличие поведения дифракционных зависимостей для РДС в кристаллах танталата и ниобата лития при приложении напряжения разных полярностей (ср. с [22]) обусловлено тем, что в танталате лития размеры доменов разного знака по оси X отличались друг от друга, в то время как в ниобате лития, ввиду наклона доменных стенок к полярной оси Z, осуществлялась подстройка зондирующего луча вдоль последней для выбора его положения таким образом, чтоб эти размеры были одинаковыми.



**Рис. 2.** Динамика эффективности дифракции Брэгга на РДС в первый порядок, наблюдаемая после приложения внешнего постоянного напряжения, для зондирующего лазерного пучка с интенсивностью в максимуме  $I_1 = 2,1$ ,  $I_2 = 6,6$  и  $I_3 = 27,1$  мВт/мм<sup>2</sup>

Следует отметить, что когда после окончания релаксационного процесса согласно рис. 2а происходило выключение подаваемого напряжения  $-200$  В, то с момента выключения можно было видеть картину, схожую с представленной на рис. 2б. И наоборот, если после окончания релаксационного процесса согласно рис. 2б подаваемое напряжения  $+200$  В выключалось, то с этого момента сразу наблюдалась картина, подобная показанной на рис. 2а.

Эти особенности поведения эффективности дифракции могут быть также, как и в [22], объяснены релаксацией напряженности электрического поля пространственного заряда  $E(t)$  в области РДС, освещаемой зондирующим пучком. Для сравнительно слабой эффективности дифракции Брэгга использование того же подхода, что и в [22], позволяет описать это поле как

$$E(t) = E_m \sqrt{\frac{\eta_-(t) + \eta_+(t)}{2} - \eta_{dw}}. \quad (1)$$

Из выражения (1) и измеренных экспериментальных значений  $\eta_{dw}$ ,  $\eta_-(t)$  и  $\eta_+(t)$  была рассчитана динамика релаксации электрического поля для всех используемых значений интенсивности зондирующего пучка в засвечиваемой области РДС. Результаты расчета зависимостей  $E(t)/E_m$ , соответствующих приведенным на рис. 2 данным и значению  $\eta_{dw} = 0,01$ , представлен на рис. 3 точками.

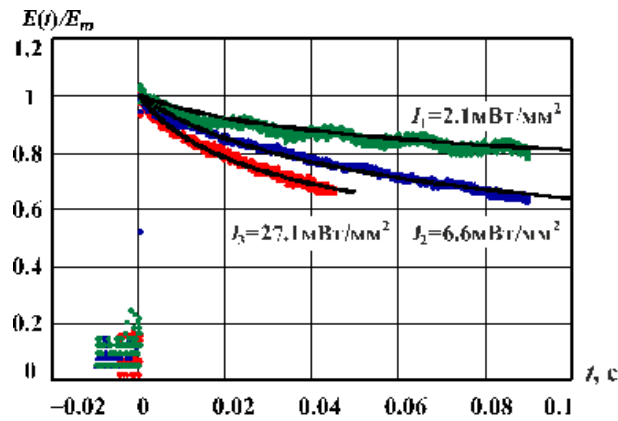


Рис. 3. Динамика электрического поля в освещенной области РДС, рассчитанная по формуле (1) из экспериментальных данных, представленных на рис. 2, и ее аппроксимация функцией (2) (сплошные кривые)

Динамика электрического поля в освещенной области РДС может быть описана аппроксимирующей функцией, аналогичной приведенной в [22]:

$$E(t, I_0) = E_m \exp\{-a_E(I_0) \ln[1 + b_E(I_0)t]\}, \quad (2)$$

где параметры  $a_E$  и  $b_E$  также могут быть определены подгонкой с использованием метода наименьших квадратов. На рис. 3 аппроксимирующие функции представлены сплошными кривыми. Максвелловский характер релаксации на начальном участке и в случае РДС с ненаклонными стенками в кристалле 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> также может быть объяснен экранировкой внешнего поля по причине вызванного этим полем перераспределения зарядов в освещенной области доменных стенок [22]. В результате такого перераспределения, в свою очередь, формируется внутреннее экранирующее поле, имеющее знак, противоположный приложенному внешнему полю. Для расчета усредненной по периоду  $\Lambda$  эффективной проводимости кристалла с РДС можно воспользоваться соотношением из [22],  $\sigma_{eff}(I_0) = \varepsilon_{33} a_E(I_0) b_E(I_0)$ , где  $\varepsilon_{33}$  – статическая диэлектрическая проницаемость кристалла. Из анализа полученных экспериментальных данных найдено, что эффективная проводимость в диапазоне интенсивностей зондирующего пучка от 0,35 до 27,1 мВт/мм<sup>2</sup> характеризуется сублинейной зависимостью, показанной точками на рис. 4.

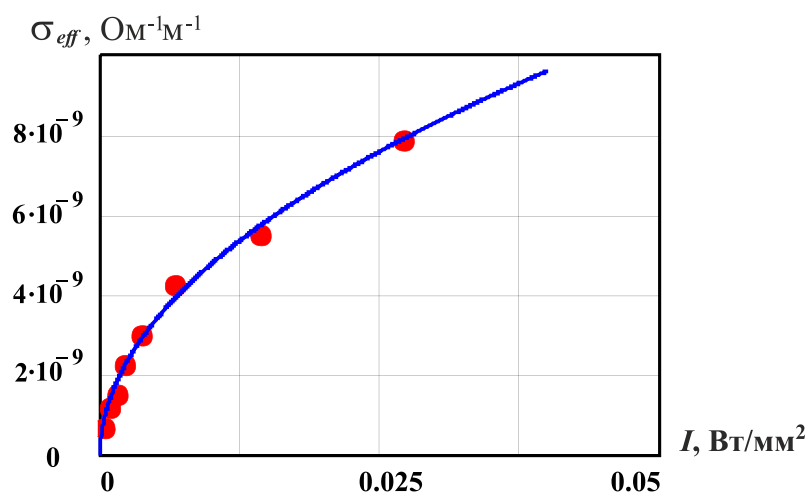


Рис.4. Зависимости фотоиндуцированной проводимости от интенсивности зондирующего пучка (точки) и её аппроксимация сублинейной кривой (сплошная линия)

Для аппроксимации экспериментальных данных рис.4 использовалась функция вида:

$$\sigma_{eff}(I) = \beta_{ph} \sqrt{I}, \quad (3)$$

с коэффициентом пропорциональности  $\beta_{ph} = 48 \cdot 10^{-9} \text{ А}^{-1} \cdot \text{Ом}^{-3/2}$ .

Для зондирующего пучка с интенсивностью  $I_0 = 27 \text{ мВт/мм}^2$  эффективная проводимость исследуемой РДС была оценена, как  $\sigma_{eff} = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , что превышает известное для  $\text{LiTaO}_3$  значение темновой проводимости,  $\sigma_d \approx 7 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  [27], примерно на четыре порядка.

### Заключение

Таким образом, методом дифракции Брэгга изучена зависимость проводимости, фотоиндуцированной зондирующим лазерным пучком с длиной волны  $\lambda = 657 \text{ нм}$  и интенсивностью от 0,35 до 27 мВт/мм<sup>2</sup> в образце 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> с РДС, доменные стенки которого не имеют наклона к полярной оси кристалла Z. Проведенные исследования показали сублинейный характер зависимости от интенсивности фотоиндуцированной проводимости кристалла 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> с РДС, а наблюдаемая экспериментально максимальная величина наведенной эффективной проводимости достигала значений, на четыре порядка превышающих темновую проводимость монодоменных образцов.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020–2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

### Список источников

- [1] **Catalan, G.** Domain wall nanoelectronics / G. Catalan, J. Seidel, R. Ramesh, J. F. Scott // Reviews of Modern Physics. — 2012. — Vol. 84. — № 1. — P. 119–156.
- [2] **Шур, В. Я.** Доменная нанотехнология в монокристаллах семейства ниобата лития и танталата лития / В. Я. Шур // Наноматериалы и наноструктуры-XXI век. — 2015. — Т. 6. — №. 2. — С. 38–45.

- [3] **Shur, V. Ya.** Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate // V. Ya. Shur, A. R. Akhmatkhanov, I. S. Baturin // *Appl. Phys. Rev.* — 2015. — Vol. 2. — P. 040604.
- [4] **Ferrari, P.** Ferroelectric crystals for photonic applications / P. Ferrari, S. Grilli, P. De Natale. (Eds.) — Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2009, 2014. — 493 p.
- [5] **Yamada, M.** Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices / M. Yamada // *Rev. Sci. Instrum.* — 2000. — Vol. 71. — P. 4010–4016.
- [6] **Inoue, T.** Electrooptic Bragg deflection modulator using periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> / T. Inoue, T. Suhara. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* — 2011. — V. 23, No. 17. — P. 1252–1254.
- [7] **Mhaouech, I.** Low drive voltage electro-optic Bragg deflector using a periodically poled lithium niobate planar waveguide / I. Mhaouech, V. Coda, G. Montemezzani, M. Chauvet, L. Guilbert // *Opt. Lett.* — 2016. — Vol 41. — No. 18. — P. 4174–4177.
- [8] **Shandarov, S. M.** Electrically controllable diffraction of light on periodic domain structures in ferroelectric crystals / S. M. Shandarov, E. N. Savchenkov, M. V. Borodin, A. E. Mandel, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics.* — 2019. — Vol. 542. — P. 58–63.
- [9] **Шандаров, С. М.** Электрически управляемая дифракция света на периодических доменных структурах в сегнетоэлектрических кристаллах / С. М. Шандаров, Е. Н. Савчнков, М. В. Бородин, А. Е. Мандель, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2018: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 66–70.
- [10] **Wang, T. J.** Electro-optically spectrum switchable, multiwavelength optical parametric oscillators based on aperiodically poled lithium niobate / T. J. Wang, L. M. Deng, H. P. Chung, W. K. Chang, T. D. Pham, Q. H. Tseng, R. Geiss, T. Pertsch, and Y. H. Chen // *Opt. Lett.* — 2020. — Vol. 45. — No. 20. — P. 5848–5851.
- [11] **Schröder, M.** Conducting domain walls in lithium niobate single crystals. / M. Schröder, A. Hausmann, A. Thiessen, E. Soergel, T. Woike, L. M. Eng // *Adv. Funct. Mater.* — 2012. — Vol. 22. — P. 3936–3944.
- [12] **Werner, C. S.** Large and accessible conductivity of charged domain walls in lithium niobate / C. S. Werner, S. J. Herr, K. Buse, B. Sturman, E. Soegel, C. Razzaghi, I. Breunig. // *Sci. Rep.* — 2017. — Vol. 7. — P. 9862.
- [13] **Esin, A. A.** Tilt control of the charged domain walls in lithium niobate / A. A. Esin, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Appl. Phys. Lett.* — 2019. — Vol. 114. — P. 092901.
- [14] **Савченков, Е. Н.** Дифракция света на регулярной доменной структуре с наклонными стенками в MgO:LiNbO<sub>3</sub> / Е. Н. Савченков, С. М. Шандаров, С. В. Смирнов, А. А. Есин, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // *Письма в ЖЭТФ.* — 2019. — Том 110. — №3. — С. 165–169.
- [15] **Шандаров, С. М.** Дифракция света в сегнетоэлектрических кристаллах на периодически поляризованных структурах с заряженными и нейтральными доменными стенками / С. М. Шандаров, Е. Н. Савченков, С. В. Смирнов, А. Е. Шараева, В. А. Краковский, Л. Я. Серебренников, А. А. Есин, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — С. 265–273.
- [16] **Александровский, А. Л.** Линейная и нелинейная дифракционные решетки в монокристаллах ниобата лития с периодической доменной структурой / А. Л. Александровский, О. А. Глико, И. И. Наумова, В. И. Прялкин // *Квантовая электроника.* — 1996. — Том 23. — № 7. — С. 657–659.
- [17] **Müller, M.** Investigation of periodically poled lithium niobate crystals by light diffraction / M. Müller, E. Soergel, K. Buse, C. Langrock, M. M. Fejer // *J. Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 97. — P. 044102.



- [18] **Shandarov, S.M.** Collinear and isotropic diffraction of laser beam and incoherent light on periodically poled domain structures in lithium niobate / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, S. V. Smirnov, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics*. — 2016. — Vol. 496. — P. 134–142.
- [19] **Shandarov, S. M.** Linear diffraction of light waves in periodically poled lithium niobate crystal / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, A. V. Andrianova, G. I. Bolshanin, M. V. Borodin, A. Yu. Kim, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics*. — 2017. — Vol. 508. — P. 49–57.
- [20] **Шандаров, С. М.** Дифракционные и интерферометрические методы исследования периодически поляризованных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития / С. М. Шандаров, А. Е. Мандель, Е. Н. Савченков, М. В. Бородин, С. В. Смирнов, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // *Голография. Наука и практика : XIV международная конференция HOLOEXPO 2017: Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС»*. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — С. 203–209.
- [21] **Shandarov, S. M.** Linear diffraction of light waves on periodically poled domain structures in lithium niobate crystals: collinear, isotropic, and anisotropic geometries / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, E. N. Savchenkov, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Yu. Shur // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — Vol. 867. — P. 012017.
- [22] **Савченков, Е. Н.** Наблюдение фотоиндуцированной проводимости регулярной доменной структуры с наклонными стенками в  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  на длине волны 632.8 нм при дифракции Брэгга / Е. Н. Савченков, А. В. Дубиков, А. Е. Шараева, Н. И. Буримов, С. М. Шандаров, А. А. Есин, А. Р. Ахматханов, В. Я. Шур // *Письма в ЖЭТФ*. — 2020. — Том 112. — № 10. — С. 644–649.
- [23] **Lu, Y. Q.** Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice and its applications / Y. Q. Lu, Z. L. Wan, Q. Wang, Y. X. Xi, N. B. Ming // *Appl. Phys. Lett.* — 2000. — Vol. 77. — P. 3719–3721.
- [24] **Savchenkov, E. N.** Photoinduced conductivity during sub-bandgap illumination in periodically poled  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  with charged domain walls / E. N. Savchenkov, A. V. Dubikov, D. E. Kuzmich, A. E. Sharaeva, S. M. Shandarov, N. I. Burimov, M. A. Chuvakova, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Optical Materials* — 2021. — Vol. 122. — P. 111813
- [25] **Wengler, M. C.** Ultraviolet light-assisted domain inversion in magnesium-doped lithium niobate crystals / M.C. Wengler, U. Heinemeyer, E. Soergel, K. Buse // *J. Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 98. — Art. 064104.
- [26] **Шандаров, С. М.** Дифракционные методы исследования регулярных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах семейства ниобата и танталата лития / С. М. Шандаров, Е. Н. Савченков, Н. И. Буримов, А. В. Дубиков, Д. Е. Кузьмич, Д. А. Губинская, М. А. Федянина, А. Р. Ахматханов, А. А. Есин, В. Я. Шур // *HOLOEXPO 2021: Тезисы докладов*. — 2021 — P. 68–76.
- [27] **Yatsenko, A. V.** Electrical Properties of  $\text{LiTaO}_3$  Single Crystals at 290–450 K / A. V. Yatsenko, M. N. Palatnikov, O. V. Makarova, N. V. Sidorov & S. V. Yevdokimov // *Ferroelectrics* — 2015 — 477:1 — P.47–53.

# Investigation of diffraction characteristics and photoinduced conductivity of regular domain structures in a lithium tantalate crystal based on Bragg diffraction methods

*E. N. Savchenkov<sup>1</sup>, N. I. Burimov<sup>1</sup>, S. M. Shandarov<sup>1</sup>, A. R. Akhmatkhanov<sup>2</sup>, M. A. Chuvakova<sup>2</sup>, V. Y. Shur<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

The paper presents the results of a Bragg diffraction study of the characteristics of regular domain structures (RDS) created in ferroelectric crystals of 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> by switching polarization under the action of an external spatially periodic field. Isotropic and anisotropic Bragg diffraction on disturbances of optical properties created by RDS in a 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> crystal in the absence of an external field has been experimentally studied for wavelengths of 532 and 633 nm. The effective photoinduced conductivity was studied by relaxation of the Bragg diffraction efficiency in an applied constant electric field of RDS in a 1%MgO:LiTaO<sub>3</sub> crystal having non-inclined domain walls for wavelengths of 532, 633 and 657 nm. The sublinear character of conductivity dependence on the intensity of the inducing radiation are established for this RDS.

Keywords: Regular domain structures, Bragg diffraction, Anisotropic diffraction, Lithium tantalate, Domain walls, Photoinduced conductivity.

# Аберрации голограмм, обусловленные нарушением закона Брэгга и вариациями глубины и формы профиля их поверхностной решетки

С. Н. Корешев<sup>1</sup>, С. О. Старовойтов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал АО «Корпорация «Комета» - «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы аберрации голограмм, обусловленные нарушением закона Брэгга и вариациями глубины и формы профиля их поверхностной решетки. Работа выполнена для случаев отражательной рельефно-фазовой голограммы и пропускающей объемной голограммы без потерь. Установлено, что приведенное в литературе и широко используемое предположение о том, что изображающие свойства голограммы, в том числе и ее аберрации, полностью определяются картиной выхода страт на поверхность голограммы верно для отражающих рельефно-фазовых голограмм и верно лишь отчасти для пропускающих объемных голограмм. У них отступления от закона Брэгга, как по углу падения, так и по длине волны восстанавливающего пучка могут привести к значительным аберрациям в преобразуемых голограммными оптическими элементами пучках лучей.

*Ключевые слова:* Голограммные оптические элементы, Изображающие свойства, Аберрации голограмм, Закон Брэгга, Объемные голограммы, Рельефно-фазовые голограммы.

*Цитирование:* Корешев, С. Н. Брэгга и вариациями глубины и формы профиля их поверхностной решетки / С. Н. Корешев, С. О. Старовойтов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 114–120.

## Введение

Современные методы расчета оптических систем, содержащих голограммные оптические элементы (ГОЭ), основываются на предположении о том, что изображающие свойства голограммы, в том числе и ее аберрации, полностью определяются соответствующей ей поверхностной решеткой, т. е. картиной выхода страт на поверхность голограммы [1]. При этом толщина для объемной голограммы или высота и форма профиля рельефа в случае рельефно-фазовой голограммы оказывают влияние лишь на ее дифракционную эффективность. Поэтому исследователи, старающиеся оптимизировать разрабатываемые оптические системы с ГОЭ как по аберрационным характеристикам, так и по дифракционной эффективности, ограничиваются лишь введением модулей расчета дифракционной эффективности в традиционные программы расчета оптических систем, обеспечивающие трассировку лучей в системах, содержащих поверхностные дифракционные решетки [2]. При таком, широко используемом в настоящее время, подходе к расчету и разработке оптических систем с ГОЭ полностью игнорируется влияние на аберрации голограмм таких важных факторов как вариации высоты и формы профиля рельефно-фазовых голограмм и нарушение закона Брэгга для объемных голограмм.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния указанных выше параметров голограмм на их абберационные свойства, выполненного с целью определения условий, при которых их можно считать справедливым. Исследование проведено для случаев отражательных рельефно-фазовых голограмм и объемных диэлектрических пропускающих голограмм без потерь.

## 1. Оценка влияния вариаций высоты и формы профиля отражательных рельефно-фазовых ГОЭ на абберации, вносимые ими в преобразуемые волновые фронты

При проведении анализа будем исходить из того, что форма профиля голограммных структур, близка к форме равнобокой трапеции. Кроме того, будем считать, что бока трапеции лежат на касательных, к кривой, описывающей профиль, в точках, соответствующих половине высоты рельефа (см. рис. 1).

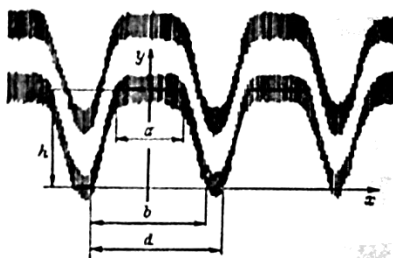


Рис. 1. Параметры, описывающие форму профиля рельефа

Буквами  $a$  и  $b$  на этом рисунке обозначены основания трапеции,  $h$  – ее высота, а  $d$  – локальный пространственный период в данной точке голограммной структуры. Запишем выражение, описывающее амплитуду поля  $U(x)$ , отраженного от одномерной рельефной структуры, освещаемой нормально падающей плоской волной единичной амплитуды, в плоскости  $y=0$ , т.е. в плоскости, соприкасающейся с «низинами» рельефа:

$$U(x) = R \left\{ \sum_{n=0}^N \left[ \exp(-jk2h) \operatorname{rect} \left( \frac{x-nd}{a} \right) + \operatorname{rect} \left( \frac{x-(n+\frac{1}{2})d}{a-b} \right) + \exp \left[ -jk \left( -\frac{4h}{b-a} \left( x - \frac{b}{2} - nd \right) \right) \right] \operatorname{rect} \left( \frac{2x-\frac{a+b}{2}-2nd}{b-a} \right) + \exp \left[ -jk \left( \frac{4h}{b-a} \left( x + \frac{b}{2} - (n+1)d \right) \right) \right] \operatorname{rect} \left( \frac{2x+\frac{a+b}{2}-2(n+1)d}{b-a} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число;  $N+1$  – число периодов структуры, освещаемых плоской волной;  $n$  – индекс суммирования;  $R$  – коэффициент отражения по амплитуде поверхности голограммы;  $h$  – высота рельефа;  $a$  и  $b$  – размеры оснований трапеции;  $d$  – пространственный период структуры. Из (1) с помощью преобразования Фурье найдем выражение, описывающее амплитуду поля, продифрагировавшего на рельефной структуре, в дальней зоне  $V(\xi)$ :

$$V(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x) \exp(-2\pi\xi x) dx, \quad (2)$$

где  $\xi$  – пространственная частота.

Анализируя выражение (2) с учетом (1) можно сделать вывод о том, что не только интенсивность, но и фаза восстановленной волны зависит от параметров рельефа

голограммной структуры. Причем фаза формируемой ГОЭ волны для каждого значения  $\xi$  может быть вычислена с точностью до постоянной при помощи выражения:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\operatorname{Im}(V(\xi))}{\operatorname{Re}(V(\xi))}. \quad (3)$$

Следовательно, вариации высоты либо параметров формы профиля рельефа в пределах апертуры ГОЭ обуславливают появление дополнительной разности, иначе говоря, приводят к абберациям ГОЭ. Аналитическое выражение, описывающее зависимость фазы волны в первом порядке дифракции от параметров рельефа, может быть представлено исходя из (1–3) в виде:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{LA_1 A_2(B_2 C_2 + B_1 C_1) - A_2^2 B_2 C_1 - A_1^2 B_1 C_2}{A_1 A_2(B_2 C_1 - B_1 C_2) + LA_2^2 B_1 C_1 - LA_1^2 B_2 C_2}, \quad (4)$$

где  $A_1 = \sin(2\pi H)$ ,  $L = Q/(2H)$ ,  $A_2 = \cos(2\pi H)$ ,  $S = (a+b)/(2d)$ ,  $B_1 = \sin(\pi S)$ ,  $Q = (b-a)/(2d)$ ,  $B_2 = \cos(\pi S)$ ,  $H = h/\lambda$ ,  $C_1 = \sin(\pi Q)$ ,  $C_2 = \cos(\pi Q)$ .

Результаты расчета фазы восстановленной волны, выполненные с помощью выражения (4) для различных значений параметров  $h$ ,  $S$  и  $Q$ , свидетельствуют о том, что в наиболее интересном, с точки зрения отражательного ГОЭ, случае глубины рельефной структуры, не превышающей  $2h_0$ , где  $h_0$  — глубина рельефа, обеспечивающая максимальную дифракционную эффективность для данной формы профиля, фаза восстановленной волны практически пропорциональна глубине рельефа. При этом коэффициент пропорциональности всецело определяется величинами параметров  $S$  и  $Q$ , описывающими форму профиля ГОЭ. Своеобразным исключением является случай прямоугольного профиля, т.е.  $Q = 0$ , при котором коэффициент пропорциональности зависимости  $\varphi$  от  $h$  равен  $K = K_0 = -2\pi/\lambda$  независимо от величины параметра  $S$ , и случай профиля со скважностью  $S = 0,5$ , который характеризуется той же величиной коэффициента пропорциональности независимо от величины параметра  $Q$ . В остальных случаях коэффициент пропорциональности зависит как от величины параметра  $Q$ , так и от величины параметра  $S$ . Таким образом, вариации глубины и формы профиля рельефно-фазовой голограммной структуры ГОЭ в пределах его апертуры однозначно приводят к абберациям в восстановленном в первом порядке дифракции волновом фронте. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в наиболее часто встречающихся на практике случаях прямоугольной формы профиля рельефа с любой скважностью допустимыми с точки зрения критерия Рэлея можно считать вариации высоты рельефа отражательных голограмм, не превышающие  $1/4$  рабочей длины волны. Аналогичный вывод будет справедлив и для рельефа со скважностью  $0,5$  при любой форме его профиля. При других параметрах формы профиля рельефа, например при его скважности  $0,3$  и  $Q$ , лежащем в пределах от  $0,3$  до  $0,7$ , допуск на вариации высоты рельефа должен быть уменьшен примерно на  $20\%$ . Указанная выше величина допуска на высоту рельефа свидетельствует о том, что для первого порядка дифракции отражательной рельефно-фазовой голограммы вкладом вариаций высоты рельефа в абберации голограммы на практике можно пренебречь. При этом следует иметь в виду, что вариации глубины и формы

профиля рельефной структуры оказывают влияние не только на первый, но и на остальные порядки дифракции.

## 2. Влияние нарушения закона Брэгга при восстановлении объемных голограмм на aberrации, вносимые ими в преобразуемые волновые фронты

Анализ влияния нарушений закона Брэгга на aberrационные свойства объемных голограмм проведем в рамках теории Когельника [3]. При этом ограничимся лишь случаем диэлектрических пропускающих голограмм без потерь. В соответствии с [3] комплексная амплитуда волны, восстановленной с помощью рассматриваемой объемной голограммы, -  $S$  с точностью до постоянной фазы может быть описана с помощью выражения:

$$S = Ue^{-j\xi}, \quad (5)$$

где:  $U$  – действительная амплитуда, определяемая параметрами голографической решетки и не зависящая от величин  $\Delta\theta$  и  $\Delta\lambda$ , описывающих отступление от закона Брэгга по углу падения и длине волны восстанавливающей волны;  $\xi$  – фаза восстановленной волны, описываемая выражением

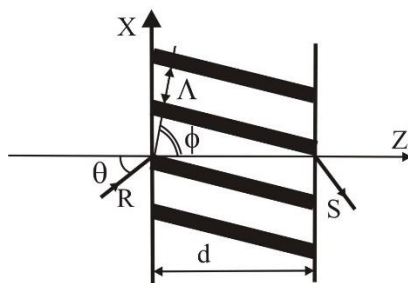
$$\xi = \frac{\vartheta d}{2C_s} \quad (6)$$

Здесь:  $d$  – толщина голограммы,  $\vartheta$  – параметр, описывающий величину отступлений от закона Брэгга,  $C_s$  – параметр, учитывающий длину волны записи решетки, ее период, угол наклона страт и угол падения опорной волны.

$$\vartheta = \frac{2\pi}{\Lambda} \left\{ \Delta\theta \sin(\phi - \theta) - \frac{\Delta\lambda}{2\Lambda n} \right\}, \quad (7)$$

$$C_s = \cos\theta - \frac{\lambda}{\Lambda n} \cos\phi, \quad (8)$$

где:  $\Lambda$  – локальный период голографической решетки, измеряемый вдоль перпендикуляра к ее стратам,  $\phi$  – угол, который составляет перпендикуляр, опущенный на страты с осью  $z$ ,  $\theta$  – угол падения опорной волны при регистрации голограммы,  $n$  – показатель преломления среды голограммы (см. рис. 2).



**Рис.2.** Объемная голографическая решетка

Рассмотрим случай восстановления объемной пропускающей голограммы на длине волны ее регистрации. При этом условии выражение (6) с учетом (7) и (8) может быть преобразовано к виду:

$$\xi = 2\pi V d \Delta\theta,$$

$$V = \frac{\sin\phi \cos\theta - \cos\phi \sin\theta}{2\Lambda \left\{ \cos\theta - \frac{\lambda}{\Lambda n} \cos\phi \right\}}. \quad (9)$$

Из (9) получим выражение, описывающее дополнительный набег оптического пути восстановленной волны  $L$ , обусловленный  $\Delta\theta$ , т.е. нарушением закона Брэгга

$$L = V \lambda d \Delta\theta. \quad (10)$$

Рассмотрим частный случай объемной голограммы, страты которой располагаются перпендикулярно поверхности регистрирующей среды, т.е. рассмотрим случай  $\phi = \pi/2$ . Возможные схемы регистрации и восстановления такой объемной голограммы, или, точнее сказать, голограммной линзы представлены на рис. 3. Здесь  $H$  — голограммная линза,  $N$  — нормаль к поверхности голограммы,  $R, C, O, I$  — опорный, восстанавливающий, объектный точечные источники и восстановленное изображение, соответственно,  $\theta$  — угловая апертура рассматриваемых пучков,  $\Delta\theta$  — отступление от закона Брэгга по углу падения восстанавливающей волны.

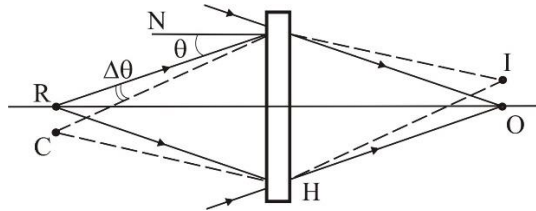


Рис.3. Схема регистрации и восстановления голограммы

В рассматриваемом случае (9) и (10) можно привести к виду

$$V = \frac{1}{2\Lambda} = \frac{\sin\theta}{\lambda}. \quad (11)$$

$$L = \Delta\theta d \sin\theta \quad (12)$$

Из (12) следует, что отступление угла падения восстанавливающей волны от угла падения объектной, либо опорной волны при регистрации голограммы на угол  $\Delta\theta$  приведет к дополнительному набегу оптического пути восстановленной волны. Величина этого дополнительного набега пропорциональна  $\Delta\theta$ ,  $d$  и локальной пространственной частоте в рассматриваемой точке голограммы, определяемой параметром  $\sin\theta$ . Сам по себе этот набег не скажется на качестве восстановленного с помощью голограммы изображения. Опасны лишь его вариации в пределах апертуры пучка лучей, соответствующего восстановленному изображению точечного источника. Эти вариации в рассматриваемом случае будут обусловлены изменением угла падения лучей восстанавливающего пучка на поверхность голограммы в пределах его угловой апертуры. Из (12) можно сделать несколько выводов. Во-первых, о том, что нарушение закона Брэгга не приводит к появлению дополнительных aberrаций объемных голограмм в случае их регистрации и восстановления с помощью параллельных опорного и восстанавливающего пучков лучей. Во-вторых, о том, что aberrации восстановленного изображения определяются апертурой восстанавливающего пучка лучей или, иными словами, распределением локальных пространственных частот по

апертуре голограммы. Так, в типичном для голографии случае  $\Delta\theta = 2^\circ = 0,04$  рад,  $\lambda = 0,63$  мкм,  $d = 10$  мкм и локальной пространственной частоты, изменяющейся от 0 до  $1600 \text{ мм}^{-1}$  ( $\sin\theta = 0,5$ ) величина дополнительного набега пути равна  $0,2$  мкм, или  $0,3\lambda$ .

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что нарушение закона Брэгга из-за несоответствия угла падения восстанавливающей волны углу падения опорной, либо объектной волны при регистрации голограммы приводит к появлению aberrаций в восстановленном с помощью голограммы изображении. Причем, величина этих aberrаций сравнима с традиционно учитываемыми aberrациями, обусловленными ее поверхностной решеткой.

Перейдем к случаю восстановления голограммы на длине волны, отличной от длины волны при ее регистрации, т.е. к случаю использования ГОЭ в качестве диспергирующих элементов спектральных приборов. При этом положим  $\Delta\theta = 0$ . При этом условии (7) можно переписать в виде

$$\vartheta = \frac{\pi\Delta\lambda}{\Lambda^2 n}, \quad (13)$$

Отсюда, с учетом (6) получим

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda d \Delta\lambda}{4\Lambda^2 n \left\{ \cos\theta - \frac{\lambda \cos\phi}{\Lambda n} \right\}}. \quad (14)$$

Для рассматриваемого ранее случая  $\phi = \pi/2$  (13) и (14) будут иметь вид

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d\Delta\lambda \sin\theta}{\Lambda n} \operatorname{tg}\theta, \quad (15)$$

$$L = \frac{d\Delta\lambda \sin\theta}{\Lambda n} \operatorname{tg}\theta. \quad (16)$$

Из (16) следует, что дополнительные aberrации, обусловленные нарушением закона Брэгга при восстановлении объемной голограммой, используемой в качестве диспергирующего элемента в спектральных приборах, вносятся в преобразуемые с ее помощью пучки лучей лишь в случае вариаций угла  $\theta$  в пределах апертуры восстанавливающего пучка лучей. Такие вариации могут быть обусловлены использованием непараллельных опорного либо восстанавливающего пучков лучей. В случае регистрации объемной голографической решетки с помощью параллельного опорного пучка и ее восстановлении параллельным восстанавливающим пучком лучей объем голограммы не приводит к дополнительным aberrациям голограммы.

### Заключение

В работе показано, что приведенное в [1] предположение о том, что изображающие свойства голограммы, в том числе и ее aberrации, полностью определяются картиной выхода страт на поверхность голограммы верно лишь отчасти. Да, действительно вариации глубины и формы профиля отражательных рельефно-фазовых голограмм при средних глубинах их профиля в четверть рабочей длины волны практически не сказываются на aberrациях преобразуемых с их помощью пучков лучей. Иная ситуация складывается в случае объемных пропускающих голограмм, восстанавливаемых непараллельным пучком лучей, или зарегистрированных с



помощью непараллельного опорного пучка лучей. Здесь отступления от закона Брэгга, как по углу падения, так и по длине волны восстанавливающего пучка могут привести к значительным аберрациям в преобразуемых ГОЭ пучках лучей. Проведенное исследование однозначно свидетельствует о необходимости дополнения программ расчета оптических систем с объемными ГОЭ модулями расчета аберраций, обусловленных отступлением от закона Брэгга.

#### Список источников

- [1] Колфилд Г. Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда — М. : Мир, 1982, — 735с.
- [2] Муслимов, Э. Р. Комплексное использование методов анализа связанных волн и трассировки лучей при проектировании спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными решетками / Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева // Тезисы докладов XVI международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. — 2019. — С. 365-373.
- [3] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // The Bell system technical journal. — 1969. — V. 48. — № 9. — P. 2909 – 2947.

## Hologram aberrations resulting from the violation of Bragg's law and variations in the depth and shape of the profile of their surface gratings

*S. N. Koreshev<sup>1</sup>, S. O. Starovoitov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Branch of "Kometa" Corporation-Scientific Engineering Research Center for Optoelectronic Surveillance Systems, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> ITMO University, St. Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, Russia

Hologram aberrations resulting from the violation of Bragg's law and variations in the depth and shape of surface gratings are investigated. Study is conducted for reflecting relief-phase holograms and lossless transmitting volume holograms. The commonly used assumption that the imaging properties of the hologram are fully determined by surface pattern was shown to be generally true for relief-phase holograms and only partially true for volume holograms. The deviations from Bragg's law can lead to significant aberrations. This study demonstrates that the modules for calculating the aberrations caused by the deviations from Bragg's law should be added to the optical design software.

*Keywords:* Aberrations of surface relief and volume holograms, Surface pattern, Variations in the depth and shape of surface gratings, Violation of Bragg's law.

# Гибридный метод расчета дифракционных оптических элементов, формирующих заданные распределения освещенности

*Л. Л. Досколович<sup>1,2</sup>, А. А. Мингазов<sup>1,2</sup>, Е. В. Бызов<sup>1,2</sup>, Д. А. Быков<sup>1,2</sup>, Е. А. Безус<sup>1,2</sup>,  
Р. В. Скиданов<sup>1,2</sup>, Н. Л. Казанский<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Предложен метод расчёта фазовой функции светового поля, обеспечивающей формирование требуемого распределения освещённости в приближении геометрической оптики. В рамках метода задача расчёта фазовой функции сформулирована в полудискретной форме как задача максимизации вогнутой функции, для решения которой используется градиентный метод. С использованием предложенного метода рассчитана фазовая функция, обеспечивающая формирование сложного распределения освещённости в виде гексаграммы. Показано, что гибридный подход, состоящий в использовании полученного геометрооптического решения в итерационном алгоритме Гершберга–Сакстона, позволяет рассчитывать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с квазирегулярной структурой микрорельефа.

*Ключевые слова:* дифракционные оптические элементы, геометрическая оптика, гибридный метод, алгоритм Гершберга–Сакстона.

*Цитирование:* Досколович, Л. Л. Гибридный метод расчета дифракционных оптических элементов, формирующих заданные распределения освещенности / Л. Л. Досколович, А. А. Мингазов, Е. В. Бызов, Д. А. Быков, Е. А. Безус, Р. В. Скиданов, Н. Л. Казанский // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 121–125.

## Введение

В последние годы задачи дизайна дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в рамках скалярной теории дифракции вновь стали предметом интенсивных исследований. Основными причинами интереса к данной области исследований являются компактность, технологичность и эффективность применения ДОЭ при решении широкого класса задач по преобразованию и фокусировке оптического излучения. Поскольку высота микрорельефа ДОЭ пропорциональна фазовой функции светового поля, формируемого ДОЭ, то задачу расчета ДОЭ обычно рассматривают как задачу расчета фазовой функции. Для решения данной задачи предложены различные итерационные алгоритмы, включающие «классический» алгоритм Гершберга–Сакстона (ГС-алгоритм) и его различные модификации. Несмотря на долгую историю (ГС-алгоритм был предложен в 1972 году), существующие итерационные алгоритмы всё ещё имеют существенные недостатки, обусловленные проблемами медленной сходимости и стагнации итерационного процесса в локальных минимумах. Кроме того, микрорельеф ДОЭ, рассчитанный итерационным алгоритмом, как

правило, имеет сложный и нерегулярный вид, зачастую напоминающий белый шум. Такой рельеф сложен в изготовлении, а также приводит к формированию спекл-структур, заметно ухудшающих качество формируемого распределения.

Для «борьбы» с указанными проблемами были предложены «гибридные» методы, основанные на совместном использовании итерационных алгоритмов и геометрических методов [1–3]. Использование геометрической фазовой функции в качестве начального приближения обеспечивает, как правило, быструю сходимость итерационного алгоритма. При этом получаемая в итерационном алгоритме фазовая функция сохраняет квазирегулярный вид, что существенно упрощает изготовление ДОЭ.

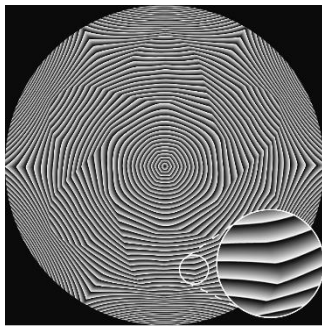
В настоящей работе рассматривается метод расчёта геометрической фазовой функции, заданной в области  $G$  плоскости  $z=0$ , из условия формирования требуемого распределения освещённости в области  $D$  плоскости  $z=f>0$ . В рамках метода задача формулируется в полудискретной форме, когда требуемое непрерывное распределение освещённости аппроксимируется дискретным распределением  $L_i, i=1, \dots, N$ , заданным в  $N$  точках  $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i) \in D$ . Фазовая функция в этом случае состоит из фрагментов фазовых функций линз с фокусами в точках  $\mathbf{x}_i, i=1, \dots, N$  и имеет вид [4]

$$\varphi(\mathbf{u}) = -k \min_i (\sqrt{f^2 + (\mathbf{x}_i - \mathbf{u})^2} - \Psi_i), \quad (1)$$

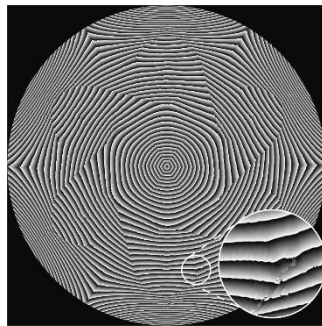
где  $\mathbf{u} = (u, v)$  — декартовы координаты в плоскости ДОЭ,  $k=2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны,  $\Psi_i$  — значения эйконала светового поля в точках фокусировки. Задача расчета фазовой функции (1) сводится к расчету значений  $\Psi_i$ , определяющих распределение энергии в точках фокусировки  $\mathbf{x}_i$ . Можно показать, что значения  $\Psi_i$ , обеспечивающие формирование заданного дискретного распределения  $L_i, i=1, \dots, N$ , соответствуют точке максимума следующей вогнутой функции [4]:

$$V(\Psi_1, \dots, \Psi_N) = \sum_{i=1}^N \int_{C(\mathbf{x}_i; \Psi_1, \dots, \Psi_N)} \left[ \sqrt{f^2 + (\mathbf{x}_i - \mathbf{u})^2} - \Psi_i \right] I_0(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u} + \sum_{i=1}^N \Psi_i L_i, \quad (2)$$

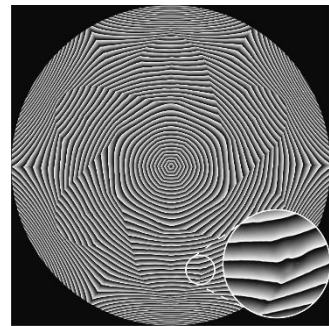
где области  $C(\mathbf{x}_i; \Psi_1, \dots, \Psi_N)$  являются «апертурами» фрагментов фазовых функций линз, образующих фазовую функцию (1). Для отыскания максимума функции  $V(\Psi_1, \dots, \Psi_N)$  было предложено использовать градиентный метод. При этом градиент функции  $V(\Psi_1, \dots, \Psi_N)$  был получен в аналитическом виде [4].



а) Геометрооптический алгоритм



б) GS-алгоритм



в) GS-алгоритм со сглаживанием

**Рис. 1.** Фазовые функции по модулю  $8\pi$ , рассчитанные различными алгоритмами



а) Геометрооптический метод



б) GS-алгоритм



в) GS-алгоритм со сглаживанием

**Рис. 2.** Распределения освещённости, формируемые при фазовых функциях на рис. 1

С использованием предложенного метода была рассчитана геометрооптическая фазовая функция (рис. 1а) для формирования постоянного распределения освещённости, заданного в сложной несвязной области в виде гексаграммы. Расчёт производился при следующих параметрах: радиус области  $G R=5$  мм, расстояние до плоскости фокусировки  $f=100$  мм, размер сторон внутренних и внешних треугольников, образующих гексаграмму,  $d_1=10$  мм и  $d_2=15$  мм, толщина линий гексаграммы  $w=0,45$  мм, длина волны  $\lambda=550$  нм. Распределение освещенности, формируемое при геометрооптической функции в приближении Френеля-Кирхгофа, показано на рис. 2а и демонстрирует достаточно хорошее качество сформированного распределения, хотя и с проявлением дифракционных эффектов (см. врезку). Нормированное среднеквадратичное отклонение (СКО) сформированного распределения от заданного постоянного распределения в виде гексаграммы составляет 17,5%. Рис. 1б и рис. 2б представляют результат оптимизации геометрооптической фазовой функции в алгоритме Гершберга–Сакстона и полученное распределение освещённости за 30

итераций (данное число итераций оказалось достаточным для сходимости алгоритма). Распределение освещенности на рис. 2б близко к «идеальному». СКО сформированного распределения (рис. 2б) от заданного распределения составляет всего 2,1%. В то же время полученная фазовая функция (рис. 1б) хотя и сохранила регулярный вид, но приобрела высокочастотную составляющую (ср. врезки к рис. 1а и 1б). На рис. 1в и рис. 2в показаны результат оптимизации геометрооптической фазовой функции в ГС-алгоритме со сглаживанием фазы [1] и полученное распределение освещенности. СКО сформированного распределения на рис. 2в от заданного распределения составляет 7,4%. Это СКО больше, чем в предыдущем случае, однако полученная фазовая функция (рис. 1в и врезка) является кусочно-гладкой.

Таким образом, представленный пример показывает, что гибридный подход, основанный на использовании геометрооптического решения в качестве начального приближения в ГС-алгоритме, позволяет рассчитывать ДОЭ с квазирегулярной (рис. 1б) или даже с гладкой фазовой функцией (рис. 1в). Такие ДОЭ, по мнению авторов, существенно проще в изготовлении и позволяют избежать формирования спекл-структур.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта 18-19-00326 Российского научного фонда.

### Список источников

- Schmidt, S.** Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping / S. Schmidt, S. Thiele, A. Toulouse, C. Bösel, T. Tiess, A. Herkommer, H. Gross, H. Giessen // *Optica*. — 2020. — Vol. 7. — № 10. — P. 1279–1286. — DOI:10.1364/OPTICA.395177.
- Feng, Z.** Composite method for precise freeform optical beam shaping / Z. Feng, B.D. Froese, R. Liang // *Applied Optics*. — 2015. — Vol. 54. — № 31. — P. 9364–9369. — DOI:10.1364/AO.54.009364.
- Yang, L.** Light-shaping design by a fourier pair synthesis: the homeomorphic case / L. Yang, I. Badar, C. Hellmann, F. Wyrowski // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29. — № 3. — P. 3621–3630. — DOI:10.1364/OE.415649.
- Doskolovich, L. L.** Hybrid design of diffractive optical elements for optical beam shaping / L. L. Doskolovich, A. A. Mingazov, E. V. Byzov, R. V. Skidanov, S. V. Ganchevskaya, D. A. Bykov, E. A. Bezus, V. V. Podlipnov, A. P. Porfirev, N. L. Kazanskiy // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29. — № 20. — P. 31875–31890.

# Hybrid method for designing diffractive optical elements generating prescribed irradiance distributions

*L. L. Doskolovich<sup>1,2</sup>, A. A. Mingazov<sup>1,2</sup>, E. V. Byzov<sup>1,2</sup>, D. A. Bykov<sup>1,2</sup>, E. A. Bezus<sup>1,2</sup>,  
R. V. Skidanov<sup>1,2</sup>, N. L. Kazanskiy<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

We develop a method for calculating the phase function of the light field providing the formation of a prescribed irradiance distribution in the geometrical optics approximation. In the method, this problem is formulated in a semi-discrete form as a problem of maximizing a concave function, which is solved using a gradient method. Using the proposed method, we calculate a phase function, which provides the formation of a “discontinuous” hexagram-shaped irradiance distribution. We show that the hybrid approach consisting in the use of the geometrical-optics solution in iterative Fourier transform algorithms allows one to calculate diffractive optical elements (DOEs) having a quasi-regular microrelief.

*Keywords:* Diffractive optical elements, Geometrical optics, Hybrid method, Iterative Fourier transform algorithm.

# Сравнительный анализ алгоритмов расчета оптических систем с использованием композитных голограммных оптических элементов

Д. М. Ахметов<sup>1,2</sup>, Э. Р. Муслимов<sup>1</sup>, Д. Ю. Харитонов<sup>1,2</sup>, И. А. Гуськов<sup>1,2</sup>, Н. К. Павлычева<sup>1</sup>,  
А. Р. Гильфанов<sup>1,2</sup>, А. И. Терентьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени  
А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

<sup>2</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,  
Казань, Россия

Композитный голограммный оптический элемент представляет собой голограмму, записанную шивкой нескольких субапертур. Глубина модуляции показателя преломления, наклон полос и пространственная частота голограммы могут локально изменяться в каждой из субапертур для соответствия меняющимся условиям воспроизведения голограммы. В настоящей работе рассматривается реализация и анализ двух алгоритмов расчета дифракционной эффективности (ДЭ) в схемах с использованием голограммных оптических элементов. Первый алгоритм расчета основывается на последовательном разбиении голограммного элемента. Второй алгоритм расчета основывается на осреднении локально оптимизируемых параметров голограммы. Для реализации этих алгоритмов используется программная среда Zemax, с учетом необходимости использования считывания и изменения параметров структурной голограммы в цикле используется пользовательская библиотека dll. В качестве примера рассматривается оптическая схема спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области. Рабочий спектральный диапазон составляет 40 нм и центрирован относительно длины волны излучения стандартного лазерного источника 850 нм. Числовая апертура в пространстве предметов составляет 0,14. Схема работы оптической системы состоит из коллиматора, двух объемно-фазовых пропускающих голограммных решеток, камерного объектива и фотоприемника. В качестве коллимирующего объектива выбран двухлинзовый склеенный компонент с фокусным расстоянием 100 мм, ахроматизированный для рабочей спектральной области. В качестве камерного объектива используется объектив-триплет с фокусным расстоянием 100 мм. В качестве второй решетки предполагается использовать композитный голограммный оптический элемент. Его использование позволит компенсировать изменение угла падения по площадке решетки при ее установке в диспергированном пучке, и тем самым значительно повысить характеристики оптической системы.

*Ключевые слова:* Голограммная дифракционная решетка, Композитный голограммный элемент, Дифракционная эффективность, Ближний инфракрасный диапазон.

*Цитирование:* Ахметов, Д. М. Сравнительный анализ алгоритмов расчета оптических систем с использованием композитных голограммных оптических элементов / Д. М. Ахметов, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, И. А. Гуськов, Н. К. Павлычева, А. Р. Гильфанов, А. И. Терентьев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 126–131.

## **Введение**

Проектирование оптико-электронных приборов с передовыми характеристиками в части чувствительности и разрешающей способности требует применения оптических систем с высокой светосилой, широким полем зрения и малым изменением ключевых оптических характеристик (увеличения, геометрических аберраций, потерь на отражение на поверхностях, потерь излучения из-за поглощения и рассеяния в материале оптических деталей, дифракционной эффективности и т.д.) по апертуре и полю зрения.

Проблема создания оптических систем с перечисленными характеристиками заключается в их ограничении рядом физических и технологических факторов, а также несовершенством существующих алгоритмов расчета и оптимизации.

В рамках работы предлагается реализация и анализ двух алгоритмов расчета дифракционной эффективности в схемах с использованием композитных голограммных оптических элементов (КГОЭ)[1]. В качестве примера рассматривается оптическая схема спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области.

### **Моделирование оптической схемы**

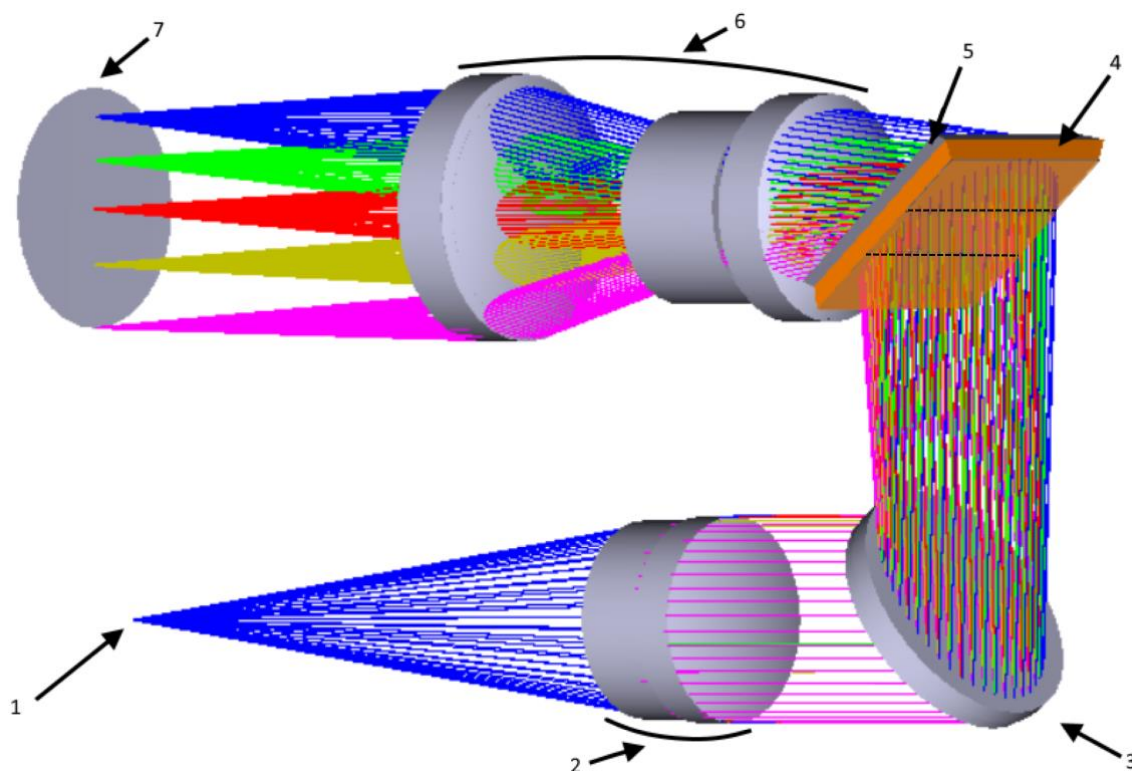
В качестве примера используется оптическая схема спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области [2]. Рабочий спектральный диапазон составляет 840 нм и центрирован относительно длины волны излучения стандартного лазерного источника 850 нм. Числовая апертура в пространстве предметов составляет 0,14. Общий вид оптической схемы представлен на рисунке 1, на схеме обозначены: 1 — оптоволоконный вход, 2 — коллимирующий объектив, 3 — первая решетка, 4 — субапертура, 5 — вторая, 6 — камерный объектив, 7 — плоскость изображения спектра [3].

### **Алгоритм расчета, основанный на последовательном разбиении элемента**

Алгоритм расчета состоит из следующих пунктов:

1. Расчет оптимальных значений угла наклона полос, амплитуды модуляции и толщины структуры голограммы по условию Брэгга для одной длины волны.
2. Внесение данных переменных, найденных из уравнения Брэгга, в модель оптической системы.
3. Внедрение в программную среду Zemax пользовательской библиотеки dll и макроса zpl. Определение границ субапертур.
4. Составление КГОЭ из субапертур, делящие поле записи на 3 части. Следующие операции повторяются для каждой длины волны.
5. Проводится пробная трассировка лучей.
6. Присваивание длин волн весовых коэффициентов пропорциональных количеству лучей проходящих через данную субапертуру.
7. Оптимизация оптической схемы с учетом требований максимизации взвешенной ДЭ[4].
8. Использование пользовательского макроса для получения результата распределения эффективности по длинам волн и по площадкам всех субапертур.





1 – оптоволоконный вход, 2 – коллимирующий объектив, 3 – первая решетка, 4 – субапертура, 5 – вторая, 6 – камерный объектив, 7 – плоскость изображения спектра

**Рис. 1.** Общий вид оптической схемы

Рассмотрим оптические характеристики системы, достигаемые при использовании композитной голограммы, разбитой на 3 равные зоны. Примеры распределения ДЭ по зрачку и полю зрения, рассчитанного по описанной выше методике для длин волн 830-870 нм, показаны на Рис.2.

Параметры голограммы полученные для каждой субапертуры в результате оптимизации сведены в таблицу 1. С учетом числа лучей прошедших через субапертуры мы получаем взвешенную ДЭ 76.1%,63.5% и 40.1% для длины волны 830,850 и 870 соответственно. Преимуществом ДЭ для контрольных длин волн соответственно составляет в 0.995,2 и 5.1 раз.

**Таблица 1.** Параметры субапертур

Субапертура	Угол наклона $i_1, ^\circ$	Угол наклона $i_2, ^\circ$	Толщина, мкм	Глубина модуляции	Результат ДЭ, %			Число лучей		
					830 нм	850 нм	870 нм	830 нм	850 нм	870 нм
1	-25	25,3	6,4	0,168	70,5	63,6	47,9	294	605	1099
2	-24,9	-24,2	3,4	0,1	78,3	69,5	30	946	1120	842
3	-25	25,3	8,3	0,05	75,5	33	0	701	216	0

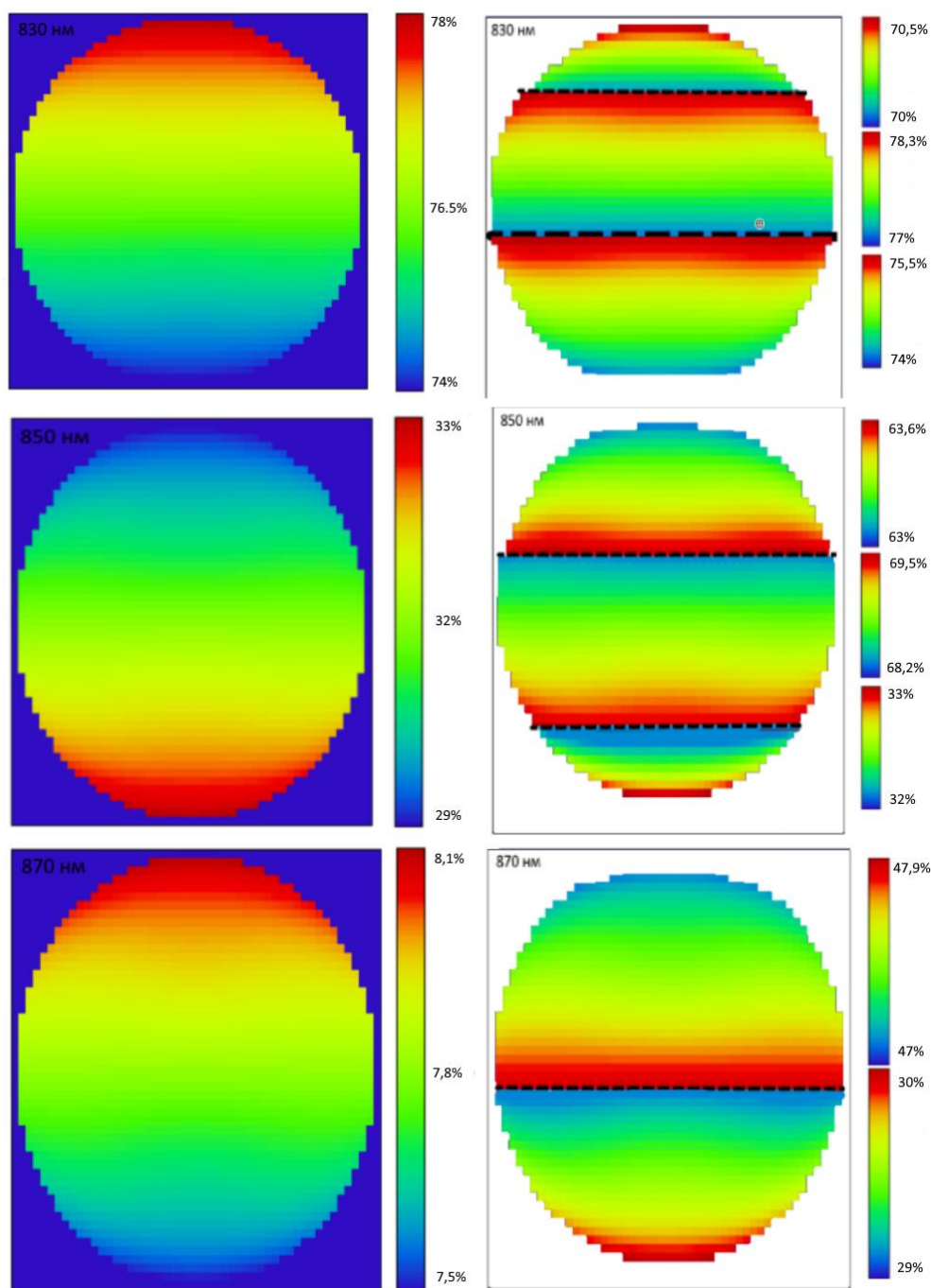


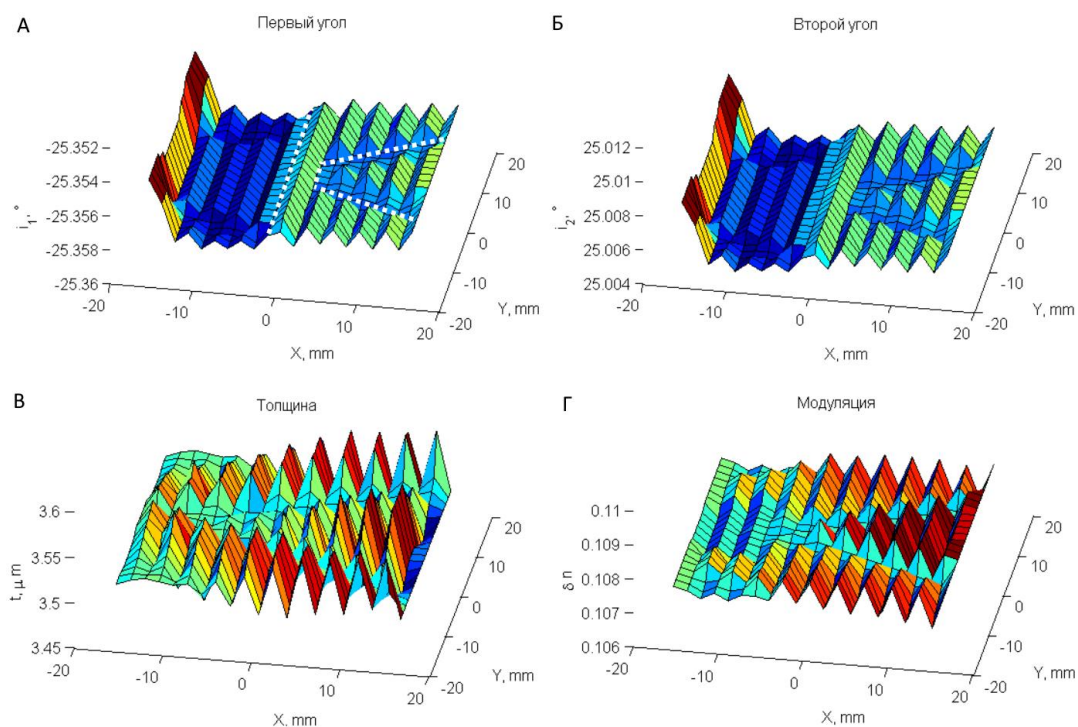
Рис. 2. Пример распределения дифракционной эффективности:слева - без использования КГОЭ; справа – с использованием КГОЭ.

### Алгоритм расчета основывается на осреднении параметров

Алгоритм расчета состоит из следующих пунктов:

1. Расчет оптимальных значений угла наклона полос, амплитуды модуляции и толщины структуры голограммы по условию Брэгга для одной длины волны.
2. В цикле сканируется площадка голограммы. Для массива малых решёток 1.6x1.6мм рассчитывается оптимальные значения параметров по алгоритму, описанному выше.
3. Производится качественный анализ полученного пространственного распределения оптимальных параметров и определение числа и формы субапертур.
4. Усредняются значения параметров голограммы в пределах каждой из субапертур.
5. Задаются параметры субапертур и проводится поверочный расчет.

На рисунке 3 показаны распределения оптимальных значений параметров голограммы, полученные с помощью данного алгоритма. Возможное разбиение на субапертуры показано пунктиром на Рис.3,А.



**Рис. 3.** Пример пространственного распределения оптимальных значений параметров голограммы: А – угол падения первого пучка в схеме записи, Б - угол падения второго пучка в схеме записи, В – толщина структуры голограммы, Г – амплитуда модуляции показателя преломления.

### Заключение

На примере спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области продемонстрированы преимущества составной голограммы. Суть состоит в более равномерном распределении дифракционной эффективности по полю и рабочей полосе спектра. Для наихудшего положения на краю спектрального диапазона прирост ДЭ достигает 5 раз для композитной голограммы с простейшей конфигурацией, состоящей из субапертур  $3 \times 1$ . Полученный результат наглядно демонстрирует эффективность первого алгоритма.

Второй алгоритм является более гибким, поскольку позволяет более эффективно определять количество и форму субапертур, но требует значительно больший объем вычислений, так как подразумевает нахождение оптимальных параметров для большого количества точек.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-79-00082.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Muslimov E. R. et al. Concept of composite holographic optical elements // Photonics Russia. – 2020. – Т. 7. – С. 586-599.
- [2] **Nureev I.I.** Methods of dispersion improvement in a fiber-fed spectrograph scheme [Text]/ Nureev I.I., Morozov O.G., Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A., Muslimov E.R., Pavlycheva N.K.//Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807 – P. 98070Y.
- [3] **Muslimov E.** Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach[Text]/ Muslimov E., Nureev I., Morozov O., Kuznetsov A., Faskhutdinov L., Sakhabutdinov A., Pavlycheva N.// Optical engineering. – 2018. – Vol.57.№.12.
- [4] **Kogelnik H.** Coupled wave analysis for thick hologram gratings // Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. P.2909–2947. [10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x)

## Comparative analysis of algorithms for design of optical systems using composite hologram optical elements

*D. M. Akhmetov<sup>1,2</sup>, E. Muslimov<sup>1</sup>, D. Kharitonov<sup>1,2</sup>, I. Guskov<sup>1,2</sup>, N. Pavlycheva<sup>1</sup>, A. Gilfanov<sup>1,2</sup>, A. Terentyev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

<sup>2</sup> JSC “Scientific-Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

A composite holographic optical element represents a hologram recorded by stitching of several elementary fields or zones. The refraction index modulation, the fringes tilt angle and the spatial frequency of the hologram can be locally changed in each of the elementary fields to match the changing reconstruction conditions of the hologram. In this paper, we consider the implementation and analysis of two algorithms for the diffraction efficiency optimization in optical designs, which use such holographic optical elements. The first computation algorithm is based on a subsequent division of the hologram element. The second computation algorithm is based on averaging of locally optimized hologram parameters. To implement these algorithms, the Zemax software environment is used. Taking into account the need to read out and change in a loop the hologram structure parameters, we use a custom dll library. As an example, optical design of a high-dispersion spectrograph for the near-IR region is considered. The working spectral range is 40 nm-wide and is centered with respect to the emission wavelength of a standard 850 nm laser source. The numerical aperture in the objects space is 0.14. The optical system consists of a collimator, two volume-phase transmission holographic gratings, a camera lens and a photodetector. A two-lens cemented component with the focal length of 100 mm, achromatized for the working spectral region, was chosen as the collimating objective. A triplet lens with the focal length of 100 mm is used as the camera lens. A composite holographic optical element is supposed to be used as the second grating. Its use will make it possible to compensate for the angle of incidence change across the grating area when it is installed in a dispersed beam, and thereby to improve significantly the key characteristics of the optical system.

*Keywords:* Holographic diffraction grating, Composite holographic element, Diffraction efficiency, Near infrared range.

# Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах

Н. М. Ганжерли<sup>1</sup>, С. Н. Гуляев<sup>2</sup>, И. А. Маурер<sup>1</sup>, А. В. Архипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

Представлены результаты совершенствования методик обработки фотоматериалов на основе желатина для создания рельефно-фазовых высокочастотных голографических решеток.

*Ключевые слова:* Голографические решётки, Бихромированный желатин, Галоидосеребряные фотоэмульсии, Пластины фотографические ПФГ-01 и ПФГ-04, Коротковолновое УФ излучение, Поверхностный рельеф, Дифракционная эффективность.

*Цитирование:* Ганжерли, Н. М. Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, А. В. Архипов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 132–133.

## Введение

Приводятся результаты исследований по созданию тонких высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток с низкой угловой селективностью и высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) на фотоматериалах на основе желатина. Ключевым моментом является использование деструктивного воздействия коротковолновым УФ излучением с длиной волны менее 270 нм [1].

## Результаты исследований

Для создания высокочастотных голографических решеток на фотоматериалах, содержащих желатин, необходимо изменение методики обработки слоев, поскольку с ростом пространственной частоты наблюдается существенный спад высоты поверхностного рельефа голографических структур. Это обусловлено влиянием сил поверхностного натяжения (СПН), возникающих во влажном слое желатина, что приводит к сглаживанию рельефа. Нами использовались слои БХЖ толщиной от 0,7 до 26 мкм, приготовленные в лабораторных условиях, а также промышленно выпускаемый фотоматериал ПФГ-04. Для подавления влияния СПН разработаны методики обработки слоев, отличающиеся от классических. Предложено сокращение времени травления в воде до 10 секунд для удаления разрушенного УФ излучением желатина из менее задубленных участков в приповерхностном слое [2], а также применение высокотемпературной обработки образцов (160-170°C), приводящей к испарению и усадке мало задубленного желатина [3]. Наилучшие результаты получены при использовании в качестве травящего агента растворов ледяной уксусной кислоты (ЛУК) в изопропиловом спирте (ИПС) с последующим купанием слоя в 100% ИПС [4]. Данная технология применена для получения высокочастотных рельефно-фазовых решеток с

частотой порядка  $1600 \text{ мм}^{-1}$  на фотоматериале ПФГ-04, при этом достигнута ДЭ рельефных решеток 67% [5].

На галоидосеребряных фотоэмульсиях материала ПФГ-01 при использовании прямого или обращающего отбеливания для избирательного задубливания эмульсионного слоя и при обработке травящим раствором ЛУК в ИПС были получены рельефные высокочастотные голографические решетки с ДЭ вплоть до 42 %.

### Заключение

Впервые продемонстрирована возможность создания эффективных высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток с ДЭ до 67 % на светочувствительных материалах, содержащих желатин. Полученные результаты будут способствовать расширению сферы применения галоидосеребряных фотоэмульсий и БХЖ в голографии.

### Список источников

- [1] **Гуляев С.Н.** / Ратушный В.П. Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании // Оптический журн. — 2003. — Т. 70. — № 2. — С. 45-49.
- [2] **Ганжерли Н.М.** Механизмы создания рельефных высокочастотных голографических структур на бихромированном желатине, облученном коротковолновым УФ излучением / Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В. // Автотметрия. — 2020. Т. — 56. — №2. — С.92-99.
- [3] **Ганжерли Н.М.** Применение термообработки при формировании рельефно-фазовых голографических структур на бихромированном желатине / Гуляев С. Н., Маурер И. А. // Оптика и спектроскопия. — 2020. — Т. 128. — №. — 10. — С. 1507-1511.
- [4] **Ганжерли Н.М.** Совершенствование технологии изготовления рельефных голографических решеток на бихромированном желатине, облученных коротковолновым УФ излучением / Гуляев С. Н., Маурер И. А. // Оптика и спектроскопия. — 2021. — Т. 129. — № 10. — С. 1276-1279.
- [5] **Ганжерли Н.М.** Регистрация высокочастотных рельефно-фазовых голографических структур на фотоматериале ПФГ-04 / Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В. // Письма в ЖТФ. — 2021. — Т. 47. — №. 21. — С. 13-15.

## Relief-phase high-frequency holographic gratings on gelatin-containing photosensitive media

*N. M. Ganzherli<sup>1</sup>, S. N. Gulyaev<sup>2</sup>, I. A. Maurer<sup>1</sup>, A. V. Arhipov<sup>2</sup>.*

<sup>1</sup> Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

The results of the improvement of processing methods of gelatin-based photographic materials for the creation of relief-phase high-frequency holographic gratings are presented.

*Keywords:* Holographic gratings, Dichromated gelatin, Silver halide photoemulsions, Photographic plates PFG-01 and PFG-04, Short-wave UV radiation, Surface relief, Diffraction efficiency.

# Создание плоских и вогнутых VLS-решеток для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение

А. О. Колесников<sup>1</sup>, В.Н. Михайлов<sup>2</sup>, Е. Н. Рагозин<sup>1</sup>, В. П. Ратушный<sup>2</sup>, А. Н. Шатохин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «ХолоГрэйт», Санкт-Петербург, Россия

Методом интерференционной литографии изготовлены плоские и вогнутые VLS-решетки, т.е. дифракционные решетки с частотой линий, монотонно меняющейся на апертуре по наперед заданному закону. Решена обратная задача интерференционной литографии для литографической схемы с одним сферическим зеркалом-аббератором. Запись VLS-решеток двух типов производилась на халькогенидном фоторезисте с использованием непрерывного излучения аргонового лазера на длине волны 488 нм с частотами в центре 600 мм<sup>-1</sup> для плоских решёток и 2400 мм<sup>-1</sup> для сферических решёток. Частота изменялась в пределах от 530 мм<sup>-1</sup> до 670 мм<sup>-1</sup> для плоских решёток и от 2100 мм<sup>-1</sup> до 2700 мм<sup>-1</sup> для сферических решёток на краях апертуры. Параметры решеток соответствуют расчетным. Решетки испытаны в спектрометрах скользящего падения с плоским полем, получены линейчатые спектры многозарядных ионов с высоким разрешением, возбуждаемые в лазерной плазме.

*Ключевые слова:* VLS-решетка, интерференционная литография, халькогенидный фоторезист, спектрограф с плоским полем, мягкое рентгеновское излучение, лазерная плазма.

*Цитирование:* Колесников, А. О. Создание плоских и вогнутых VLS-решеток для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение / А. О. Колесников, В. Н. Михайлов, Е. Н. Рагозин, В. П. Ратушный, А. Н. Шатохин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 134–137.

## Введение

Современные спектральные приборы для ВУФ и мягкой рентгеновской области спектра основаны на применении плоских и вогнутых VLS-решеток, т.е. дифракционных решеток, у которых частота линий на апертуре монотонно меняется по наперед заданному закону:  $p(y) = p_0 + p_1y + p_2y^2 + p_3y^3 + \dots$  [1]. Применение VLS-решеток позволяет создавать (i) монохроматоры с постоянным фокусным расстоянием, постоянным углом отклонения и неподвижными щелями; (ii) спектрографы с плоским полем, совместимые с современными ПЗС-детекторами. VLS-решетки используются в приборах рентгеновской астрономии, при работе с синхротронными источниками, ЛСЭ, лазерной плазмой, быстрыми электрическими разрядами и др. VLS-решетки изготавливают на программируемых гравировальных станках, электронно-литографических установках с точностью позиционирования ~10 нм на апертуре ~100 × 10 мм, а также методом интерференционной литографии. В настоящей работе мы сообщаем об изготовлении плоских и вогнутых VLS-решеток методом интерференционной литографии на длине волны 488 нм.

# 1. Оптическая схема интерференционной литографии и изготовление решеток

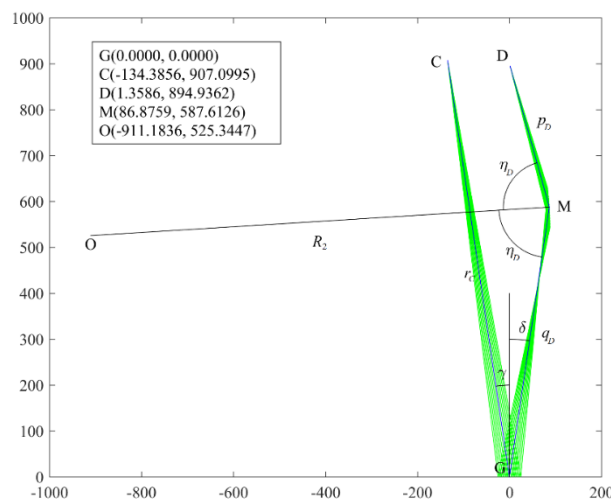
На первом этапе выполнялся расчет оптических схем, в каждом отдельном случае реализующих требуемое распределение частоты интерференционных полос на апертуре подложки. В схеме применялось сферическое зеркало-аббератор. В таблице 1 даны расчетные (проектные) и измеренные коэффициенты  $p_i$  для плоской VLS-решетки, предназначенной для работы в изображающих спектрометрах на области 111 – 138 Å и 125 – 250 Å, а на рисунке 1 – расчетная литографическая схема на длине волны 488 нм.

Незначительное отличие коэффициентов  $p_i$  от расчетных легко компенсируется при окончательной юстировке спектрографа.

Использовались суперполированные подложки из стекла К8 (плоские) и кварцевого стекла КУ1 ( $R = 6000$  мм). На подложки в камерах вакуумного напыления наносился слой халькогенидного фоторезиста с заданными параметрами, обеспечивающими необходимую светочувствительность. Последующее экспонирование лазерным излучением с длиной волны 488 нм и химическое травление обеспечивало получение заданной глубины рельефа. После этого было нанесено золотое отражающее покрытие толщиной 40 нм.

**Таблица 1.** Расчётные и измеренные коэффициенты  $p_i$  для плоской VLS-решетки

Параметр	Расчет	Измерение
$p_0$ , мм <sup>-1</sup>	600	599,98
$p_1$ , мм <sup>-2</sup>	2,37	2,285
$p_2$ , мм <sup>-3</sup>	$6,94 \times 10^{-3}$	$6,63 \cdot 10^{-3}$
$p_3$ , мм <sup>-4</sup>	$1,79 \times 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$



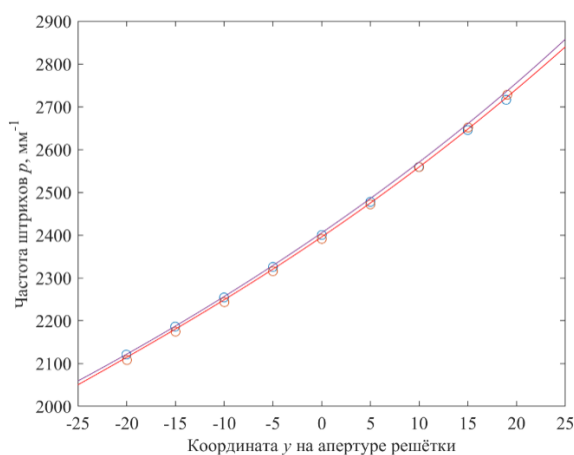
**Рис. 1.** Расчетная схема записи плоской VLS-решетки. С и D – “точечные” источники сферической волны. G – записываемая решетка. Центр решетки, G – начало координат. Поверхность решетки параллельна оси  $x$ . Нормаль  $R_2$  берется в т. М. Угол  $\eta_b$  отсчитывается от этой нормали. O – центр кривизны зеркала радиусом 1000 мм. На вставке даны координаты точек с избыточной точностью.



На рисунке 2 показаны расчетная и измеренная частота линий VLS-решетки с  $p_0 = 2400 \text{ мм}^{-1}$ , а в таблице 2 — её расчётные и измеренные коэффициенты  $p_i$ . Измерения проводились в автоколлимационной схеме с применением прецизионных поворотного и трансляционного столиков. Глубина квазисинусоидального профиля, измеренная по отношению интенсивностей первого и нулевого порядков дифракции на длине волны  $6328 \text{ \AA}$ , составила 11,9, 10,8 и 7,5 нм соответственно на низкочастотном краю, в центре, и на высокочастотном краю апертуры.

**Таблица 2.** Расчётные и измеренные коэффициенты  $p_i$  для сферической VLS-решетки

Параметр	Расчёт	Измерение
$p_0, \text{мм}^{-1}$	2405.2	2402.0
$p_1, \text{мм}^{-2}$	15.659	15.616
$p_2, \text{мм}^{-3}$	$8.2086 \times 10^{-2}$	$8.0812 \times 10^{-2}$
$p_3, \text{мм}^{-4}$	$5.1155 \times 10^{-4}$	$6.9708 \times 10^{-4}$



**Рис. 2.** Зависимость частоты линий от координаты  $y$ . Кружки — измеренные значения в  $\pm 1$  порядках дифракции. Нижняя кривая — аппроксимация результатов измерения полиномом (1), верхняя — расчётный полином (исходя из параметров схемы записи).

Плоская решетка была испытана в схеме изображающего спектрометра на область  $111 - 138 \text{ \AA}$ , и были зарегистрированы линейчатые спектры многозарядных ионов Li и F, возбуждаемые в лазерной плазме.

### Заключение

Изготовлены плоские и сферические VLS-решетки методом интерференционной литографии на длине волны  $488 \text{ нм}$ , в том числе с высокой частотой линий ( $2400 \text{ мм}^{-1}$  в центре апертуры). Параметры решеток близки к проектным значениям.

### Список источников

- [1] Рагозин Е. Н. / Е. Н. Рагозин, Е. А. Вишняков, А. О. Колесников, А. С. Пирожков, А. Н. Шатохин// Успехи физических наук. — 2021. — Том 191. — № 5. — С. 522–542.

# Production of plane and concave VLS gratings for the vacuum spectral domain by interference lithography and their application

A. O. Kolesnikov<sup>1</sup>, V. N. Mikhailov<sup>2</sup>, E. N. Ragozin, V. P. Ratushnyi<sup>2</sup>, A. N. Shatokhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> HoloGreat LLC, Saint Petersburg, Russia

Plane and concave VLS gratings were fabricated by interference lithography, i.e. diffraction gratings with a line density that varies monotonically across the aperture according to a predefined law. The inverse problem of interference lithography for a lithographic scheme with one spherical aberrator mirror was solved. Two types of VLS gratings were recorded on a chalcogenide photoresist using cw argon laser radiation at a wavelength of 488 nm with central line densities of 600 mm<sup>-1</sup> for plane gratings and 2400 mm<sup>-1</sup> for spherical gratings. The frequency varied from 530 mm<sup>-1</sup> to 670 mm<sup>-1</sup> for plane gratings and from 2100 mm<sup>-1</sup> to 2700 mm<sup>-1</sup> for spherical gratings at the edges of the aperture. The grating parameters correspond to the design ones. The gratings were tested in flat-field grazing incidence spectrometers, and high-resolution line spectra of multiply charged ions excited in a laser plasma were obtained.

*Keywords:* VLS grating, Interference lithography, Chalcogenide photoresist, Flat-field spectrograph, Soft X-rays, Laser plasma.

# Осевое мультиплексирование объемных брэгговских решеток с общим углом Брэгга в фото-термо-рефрактивном стекле

Е. С. Мусихина, С. А. Иванов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе были записаны три осевых делителя на 1550 нм (на 3, 4 и 6 решеток) в фото-термо-рефрактивном стекле с равным распределением интенсивности между лучами. Проведена оценка динамического диапазона изменения показателя преломления материала в зависимости от количества решеток, записанных в единице объема материала.

*Ключевые слова:* Дифракция, Объемные брэгговские решетки, Осевой делитель, Фото-термо-рефрактивное стекло.

*Цитирование:* Мусихина, Е. С. Осевое мультиплексирование объемных брэгговских решеток с общим углом Брэгга в фото-термо-рефрактивном стекле / Е. С. Мусихина, С. А. Иванов // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 138–141.

В фракционных лазерах деление пучка может осуществляться с помощью систем сканирования, массивов микролинз и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. Делители пучка на основе ДОЭ выполняются голографическими или литографическими методами. Преимущество голографических ДОЭ заключается в меньших трудоемкости и стоимости процесса изготовления. В основном в качестве материала для делителей на основе ДОЭ используются полимерные материалы ввиду их доступности и простоты синтеза, однако для них характерна низкая стойкость к высоким мощностям непрерывного лазерного излучения. Соответственно для задач, подразумевающих использование непрерывного лазерного излучения высокой мощности требуется другой материал. Для таких задач возможно использование фото-термо-рефрактивного (ФТР) стекла, которое имеет в составе около 70% SiO<sub>2</sub>, что повышает химическую, механическую и термическую стойкость материала и позволяет использовать элементы с лазерным излучением высокой мощности без деградации записанных структур.

Таким образом, целью данной работы является запись осевых делителей лазерного пучка с использованием осевого мультиплексирования на ФТР стекле и исследование влияния мультиплексирования на динамический диапазон показателя преломления материала.

Для проведения эксперимента на базе научно-исследовательского центра оптического материаловедения университета ИТМО было синтезировано фото-термо-рефрактивное стекло системы Na<sub>2</sub>O-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, с добавлением Ag<sub>2</sub>O, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ce<sub>2</sub>O, NaF и KBr.

Синтез стекла производился в высокотемпературной лабораторной печи Carbolite GERO при температуре 1440°C в платиновом тигле. Перемешивание расплава осуществлялось платиновой мешалкой. Отжиг стекла производился в муфельной печи в течение 10 ч при температуре 485°C.

Для проведения эксперимента были изготовлены пластины 25×12,5 мм для записи осевых делителей (с толщинами 1, 2 и 5 мм), и 30×12 мм, (с толщиной 1 мм) для исследования

влияния мультиплексирования на динамический диапазон материала. Поверхность образцов была предварительно отшлифована и отполирована.

Запись решеток в ФТР стекле осуществлялась путем облучения стекла излучением гелий-кадмиевого лазера Kimmon K Series IK3501R-G с длиной волны излучения 325 нм по асимметричной схеме. Проявление голограмм проводилось посредством термической обработки образцов: при температуре 493°C в течение 10 часов. для исследования динамического диапазона материала; для осевых делителей проявление производилось при температуре 515°C, длительность обработки подбиралась отдельно для каждого элемента.

В рамках данной работы необходимо было создать три осевых делителя на 4, 5 и 7 каналов для длины волны 1550 нм. Особенность элементов заключалась в одновременном воспроизведении всех решеток при нормальном падении излучения. Картины дифракции на расстоянии 6,5 мм от задней поверхности элемента должны представлять собой окружности радиуса 3,3–4,6 мм. Точки каждой из картин дифракции должны отстоять друг от друга на равный угол и иметь равную интенсивность (отклонение от среднего значения – не более 5%).

Одновременное воспроизведение объемных брэгговских решеток возможно в том случае, когда система решеток обладает общим углом Брэгга. Математическое описание дифракционной эффективности в угле Брэгга для такой системы отличается от предложенного Когельником [2]. В работе [3] приведено аналитическое выражение для дифракционной эффективности решетки в угле Брэгга для случая воспроизведения двух решеток с общим углом Брэгга, так же в данной работе указано, что полученные результаты могут быть распространены на случай воспроизведения  $N$  решеток с общим углом Брэгга.

Выражение для определения дифракционной эффективности  $\eta_N$  одной решетки из системы из  $N$  решеток с общим углом Брэгга в угле Брэгга выглядит следующим образом (1):

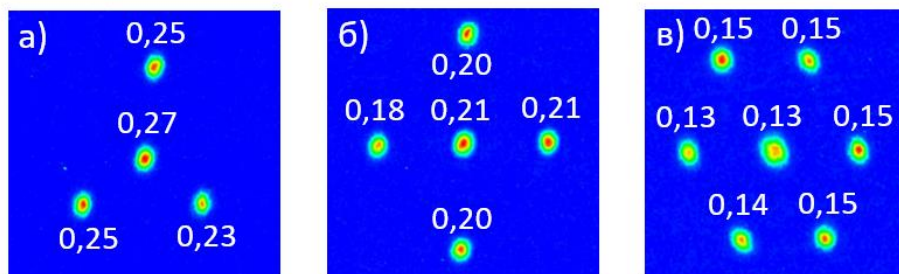
$$\eta_N = \frac{1}{N} \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot n_1 \cdot T}{\lambda \cdot \cos \theta} \right), \quad (1)$$

где  $n_1$  – амплитуда модуляции показателя преломления среды,  $T$  – эффективная толщина решетки,  $\lambda$  – длина волны излучения, падающего на решетку,  $\theta$  – угол Брэгга.

Если все  $N$  решеток делителя имеют одинаковые параметры, то дифракционная эффективность одной решетки составляет  $1/N$  от общей эффективности. Дифракционная эффективность решетки зависит от амплитуды модуляции показателя преломления, толщины решетки, длины волны излучения и угла Брэгга. Угол Брэгга и длина волны принимаются неизменными, так как исходя из их значений производился расчет прочих параметров элемента, тогда эффективность зависит от толщины решетки и амплитуды модуляции показателя преломления. Так, если увеличить толщину среды, то можно получить то же значение дифракционной эффективности с меньшими значениями амплитуды модуляции, что позволяет верхнюю границу количества решеток в элементе.

В результате было записаны 3 осевых делителя: на 4, 5 и 7 каналов. Измерение полученных элементов осуществлялось лазером с длиной волны 1549,34 нм. Данная длина волны отличается от требуемой на 0,66 нм, однако в связи с тем, что элементы считаются

на пропускание, они менее селективны по длине волны, чем если бы они работали на отражение, соответственно, согласно [2, 3], значения дифракционной эффективности данных элементов для 1550 и 1549,34 нм практически не отличаются. Демонстрация работы полученных элементов показана на Рис. 1.



**Рис. 1.** Графики уровней интенсивности дифракционных картин записанных элементов:  
а) 4 канала, б) 5 каналов, в) 7 каналов

Угол чтения элемента составил  $0^\circ$  (т. е. чтение элемента происходило при нормальном падении света на образец), угол дифракции составил  $17,26^\circ$ , что соответствует диаметру окружности дифракционной картины на расстоянии 6,5 мм от задней поверхности элемента равному 4,03 мм. Отклонение от среднего значения энергии в одном пятне дифракционной картины для каждого элемента не превышает 2%.

В дальнейшем возможна запись делителей на большее число каналов и с иным видом дифракционной картины (например, несколько концентрических окружностей с разными радиусами, прямоугольный массив точек и т. д.).

### Список источников

- [1] **Katz, S.** Using Diffractive Optical Elements: DOEs for beam shaping—fundamentals and applications / S. Katz, N. Kaplan, I. Grossinger // *Optik & Photonik*. – 2018. – Т. 13. – №. 4. – С. 83-86
- [2] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings / H. Kogelnik // *The Bell System Technical Journal*. – 1969. – V. 48 – Pp. 2909–2947.
- [32] **Case, S. K.** Coupled-wave theory for multiply exposed thick holographic gratings/ S. K. Case // *JOSA*. – 1975. – Т. 65. – №. 6. – С. 724-729.

## Axial multiplexing of common Bragg angle gratings in photo-thermo-refractive glass

*E. S. Musikhina, S. A. Ivanov*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Three axial beam splitters for 1550 nm (3, 4, and 6 gratings) were recorded in photo-thermo-refractive glass with an equal intensity distribution among the beams. The dynamic range of the

material refractive index change was estimated depending on the number of gratings recorded per unit volume of the material.

*Keywords:* Diffraction, Volume Bragg gratings, Axial beam splitter, Photo-thermo-refractive glass.

# Особенности формирования и свойства объемных и рельефных решеток в фотополимерных материалах

*П. П. Соколов, Н. Д. Ворзобова*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Определены условия получения эффективных объемных голографических решеток, а также формирования рельефных решеток на их поверхности в различных промышленных и лабораторных фотополимерных материалах. Исследованы дифракционные и селективные свойства одномерных и двумерных структур в широком диапазоне углов падения излучения. Даны рекомендации по практическому использованию элементов на основе полученных структур.

*Ключевые слова:* Дифракционные оптические элементы, Фотополимерные материалы, Голографические решетки.

*Цитирование:* Соколов, П. П. Особенности формирования и свойства объемных и рельефных решеток в фотополимерных материалах / П. П. Соколов, Н. Д. Ворзобова // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 142–144.

## Введение

Появление новых материалов и практических задач требует и определяет возможность получения новых свойств периодических структур. Если в предыдущие годы интерес к голографическим решеткам был связан преимущественно с возможностью получения высоких селективных свойств, то в последние годы появился ряд задач, требующих сочетания высоких дифракционных свойств с широким диапазоном углов падения излучения.

Целью данной работы являлось исследование процессов формирования и дифракционных свойств решеток различных типов в различных фотополимерных материалах в широком угловом диапазоне.

## 1. Условия экспериментов

Пропускающие решетки записывались голографическим методом на длине волны 633 нм. В качестве регистрирующих сред использовались промышленные материалы Baufol HX, NOA 68, Nano Clear и лабораторные акрилатные композиции [1]. Исследование дифракционных и селективных свойств решеток проводилось с использованием экспериментальной установки, позволяющей изменять направление падения излучения (650 нм) в широком диапазоне углов при вращении образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Дифракционная эффективность определялась как отношение интенсивности в первом порядке дифракции к интенсивности падающего излучения. Объектами исследования являлись одномерные ненаклонные и наклонные объемные решетки, гибридные и рельефные решетки, а также двумерные структуры.

## 2. Основные результаты

Для объемных ненаклонных решеток, записанных в материале Bayfol HX, установлены закономерности изменения дифракционной эффективности при изменении угла падения в трехмерном пространстве. Установлено, что при падении излучения в брэгговской плоскости максимальная дифракционная эффективность (более 80%) сохраняется в широком диапазоне углов (более  $100^\circ$ ). При отклонении от брэгговской плоскости максимумы дифракционной эффективности сдвигаются в сторону больших углов падения, и максимальная эффективность может достигаться при углах до  $70^\circ$  [2].

Для наклонных решеток выявлены аналогичные закономерности, однако отличительной особенностью является несимметричное расположение брэгговских плоскостей относительно нормали к поверхности решетки.

Особое внимание уделено гибридным структурам – объемным решеткам, на поверхности которых формируются рельефные решетки. Определены особенности и условия формирования таких структур. Показано, что рельефные решетки с наибольшей дифракционной эффективностью (более 45%) могут быть получены в жидких композициях. При этом соотношение дифракционной эффективности объемных и рельефной составляющих гибридной структуры зависит как от экспозиционных факторов, так и свойств материалов. Так в жидких акрилатных композициях при определенных условиях могут формироваться и объемные и рельефные решетки, в композициях NOA 68 – преимущественно объемные решетки, а материалах Nano Clear - рельефные квазиобъемные решетки. Особенностью квазиобъемных решеток является сохранение достаточно высокой дифракционной эффективности в широком диапазоне углов падения излучения – более  $100^\circ$ .

Наряду с одномерными решетками исследованы условия получения эффективных двумерных решеток в промышленных материалах и их дифракционные и селективные свойства.

Полученные результаты представляют как научный, так и практический интерес для решения задач, требующих сочетания высоких дифракционных свойств с широким диапазоном углов падения излучения. В частности, установленные свойства определяют возможность получения дифракционных дефлекторов, перенаправляющих излучение в широком диапазоне углов в одно направление. Исследование эффективности решеток при углах падения, соответствующих реальным траекториям движения Солнца, показало возможность их использования для решения задач солнечной энергетики.

Полученные свойства могут быть использованы также в технологиях защищенной печати, в частности ориентированных на визуальный контроль. Кроме того, полученные свойства определяют возможность применения решеток в качестве эффективных двух- и многоканальных расщепителей световых пучков.

## Заключение

Проведено детальное экспериментальное исследование, расширяющее представления о процессах формирования и свойствах периодических структур различных типов в различных



фотополимерных материалах и возможности практических применений материалов и структур для решения практических задач.

### **Благодарность**

Работа поддержана грантом №620167 Университета ИТМО.

### **Список источников**

- [1] **Burunkova Yu.E.** Nanomodified optical acrylate composites / Yu.E. Burunkova, S. A. Semina, L. N. Kaporski, V. V. Levichev // J. Opt. Technol. — 2008. — Vol. 75. — P. 653–657.
- [2] **Vorzobova, N.** Properties of holographic elements based on periodic structures in a wide range of angles of incidence / N. Vorzobova, P. Sokolov // Photonics. — 2021. — Vol 8. — № 12. — P. 562.

## **Peculiarities of formation and properties of volume and relief gratings in photopolymer materials**

*P. P. Sokolov, N. D. Vorzobova*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The conditions for obtaining effective volume holographic gratings, as well as the formation of relief gratings on their surface in various industrial and laboratory photopolymer materials are determined. The diffraction and selective properties of one-dimensional and two-dimensional structures are studied in a wide range of angles of radiation incidence. Recommendations are given for the practical use of elements based on the obtained structures.

*Keywords:* Diffraction optical elements, Photopolymer materials, Holographic gratings.

# **Возможности лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр»**

*А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов*

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассматриваются новые схемы лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр». Обсуждаются особенности их реализации. В качестве иллюстрации приводятся частотные характеристики осевых синтезированных голограммных оптических элементов, выполняющих функцию оптических компенсаторов.

*Ключевые слова:* Компоненты крупноформатной оптической системы, Восстановление расчетной формы, Позиционирование, Лазерно-голографический контроль, Осевой синтезированный голограммный оптический элемент, Условия космического базирования, Телескоп «Миллиметр».

*Цитирование:* Лукин, А. В. Возможности лазерно-голографического контроля процессов восстановления расчетной формы и заданного позиционирования компонентов крупноформатной оптической системы в условиях космического базирования на примере телескопа «Миллиметр» / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 145–150.

В связи с актуальной потребностью в получении больших объемов информации при изучении объектов дальнего космоса, вопросов космологии и расширении изучаемых границ Вселенной одной из современных тенденций в области создания оптических телескопов является разработка и построение крупноформатных обсерваторий наземного и космического базирования. В них крупногабаритные главные зеркала (ГЗ) проектируются и изготавливаются в виде составных (сегментных) зеркал вместо монолитных, что открывает возможность увеличения их световых диаметров до нескольких десятков метров [1 – 5].

Для составных ГЗ, имеющих, как правило, асферическую форму поверхности, отличающуюся большими асферичностью, градиентом асферичности и крутизной, на первое место выходит решение ряда задач [5 – 8]:

- контроль процессов восстановления расчетной формы т.н. «материнской» асферической поверхности;
- контроль процесса подъюстировки асферической формы поверхности во время эксплуатации;
- контроль процессов юстировки взаимного расположения ГЗ и вторичного зеркала.

Для телескопов наземного базирования также должны решаться задачи коррекции турбулентности атмосферы.

В настоящее время используются следующие методы контроля процессов сборки и юстировки крупногабаритных асферических составных зеркал [5 – 13]:

- геодезические, в т.ч. с использованием трекеров, лазерных дальномеров (сложны в реализации, трудоемкие, многостадийные, менее точные, невозможно использовать в космических условиях во время эксплуатации);

- интерференционный с компенсатором (требует изготовления дорогих объективов-компенсаторов или крупногабаритных зеркальных компенсаторов, имеются ограничения по относительному отверстию, невозможно использовать в космических условиях как вспомогательного элемента телескопа во время эксплуатации);

- лазерно-голографический на основе использования синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ) в качестве оптического компенсатора (имеются технологические ограничения по световому диаметру СГОЭ и пространственной частоте дифракционной структуры, невозможно использовать в космических условиях в качестве вспомогательного элемента телескопа во время эксплуатации).

На рис. 1 представлены общий вид и принципиальная оптическая схема телескопа космической обсерватории «Миллиметрон», а также общий вид одного из вариантов панелей первого яруса телескопа.

Основные технические характеристики составного главного зеркала (СГЗ) телескопа «Миллиметрон» [1, 7]:

- рабочая поверхность СГЗ – вогнутая параболическая, описываемая уравнением  $y^2 = 9600x$ ;

- диаметр СГЗ равен 10 м;

- СГЗ состоит из четырех типов отдельных панелей, которые должны сформировать четыре яруса; общее количество панелей СГЗ – 96;

- первый ярус – монолитная центральная часть СГЗ световым диаметром 3 м с центральным отверстием;

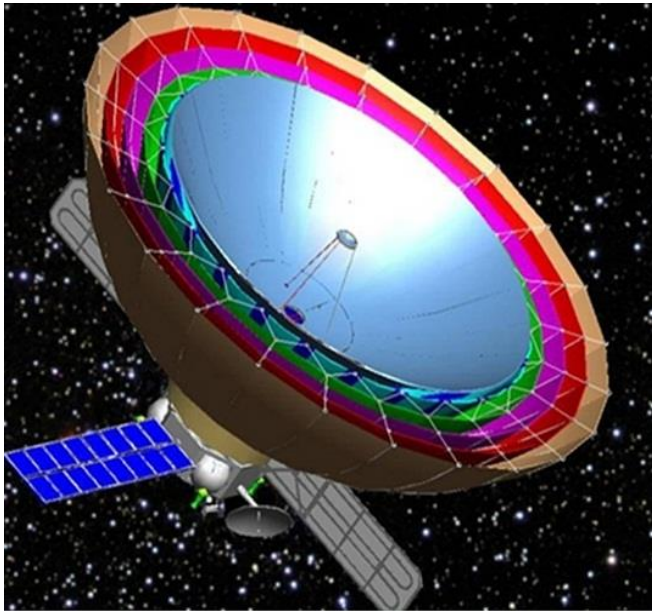
- каждая из панелей 2 – 4-го ярусов устанавливается на подвижных опорах-актуаторах;

- материал панелей – высокомодульный цианат-эфирный углепластик.

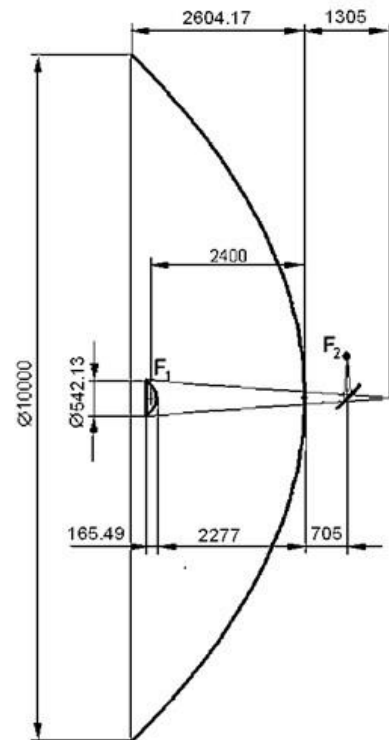
Одним из возможных подходов для обеспечения контроля процесса восстановления расчетной формы СГЗ в условиях космического базирования на этапе его раскрытия и последующих этапах эксплуатации с учетом регулярного мониторинга его асферической формы и подъюстировки является реализация технического решения, предложенного в [14] и основанного на использовании:

- осевого СГОЭ в виде кольцевой структуры (или симметричных сегментов подобного СГОЭ), нанесенного на рабочую поверхность выпуклого вторичного зеркала;

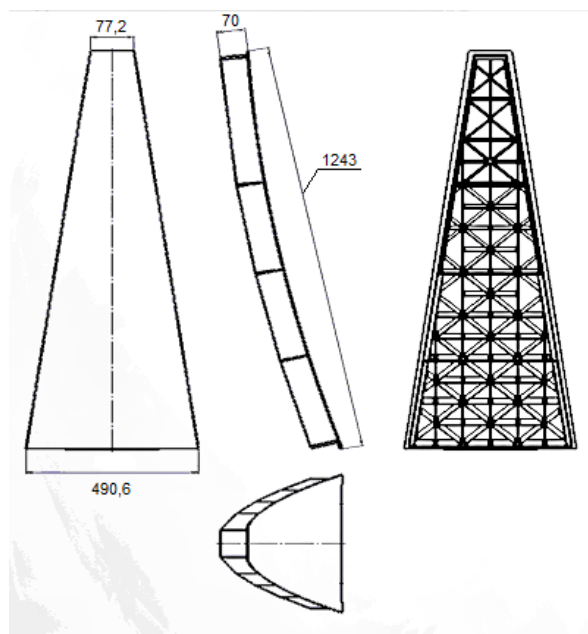
- квази-автоколлимационного хода лучей с обращением волнового фронта в объектной ветви лазерно-голографической контрольной схемы, при этом конгруэнция падающих на осевой СГОЭ и дифрагированных от него лучей должны совпадать.



а) общий вид телескопа



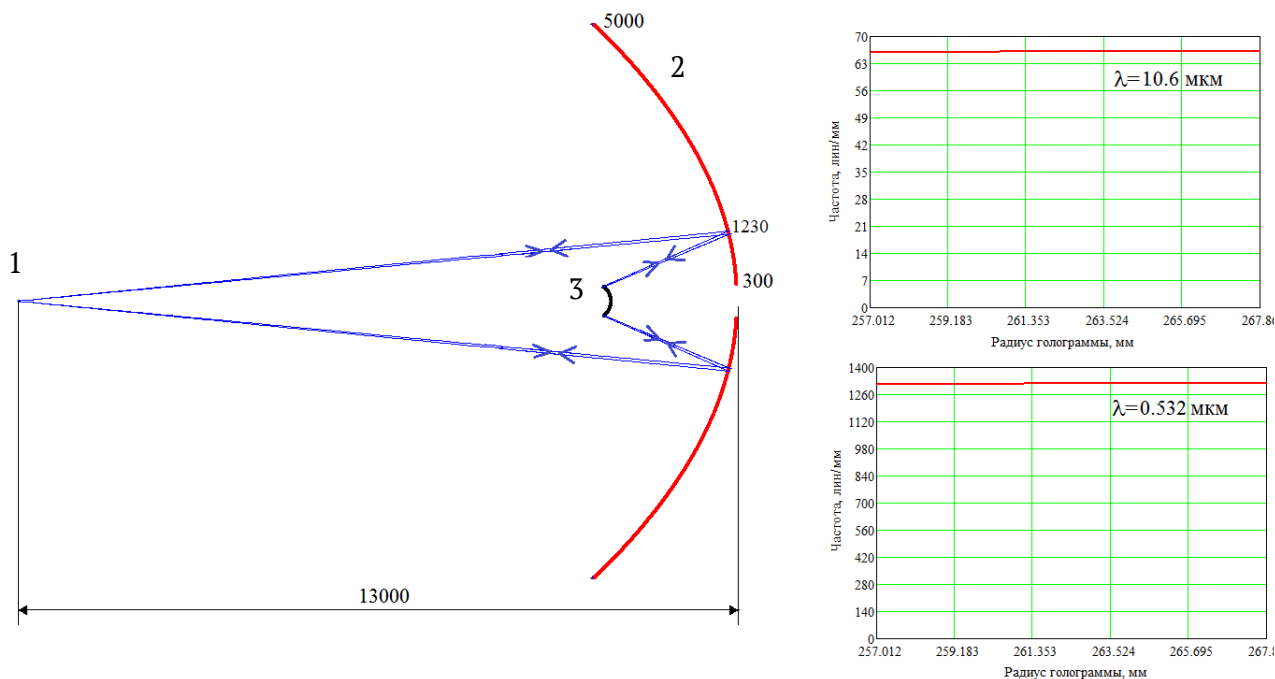
б) принципиальная оптическая схема телескопа



в) общий вид и габариты одного из вариантов панелей первого яруса (секторов центрального зеркала, которое в итоге должно стать монолитным)

**Рис. 1.** Космическая обсерватория «Миллиметр» (плановый запуск 2029 г.) [1, 7]

На рис. 2 приведены одна из возможных реализаций контрольной схемы (упрощенно) и частотные характеристики дифракционных структур соответствующих осевых СГОЭ для двух лазерных длин волн.



а) принципиальная оптическая схема объектной ветви, СГОЭ-компенсатор нанесен в краевой зоне выпуклого гиперболического вторичного зеркала

б) расчетные частотные характеристики дифракционных структур СГОЭ-компенсатора для длин волн 10,6 и 0,532 мкм

1 — монохроматический точечный источник излучения, 2 — СГЗ, 3 — выпуклое вторичное зеркало

**Рис. 2.** Предлагаемая схема контроля формы поверхности СГЗ телескопа «Миллиметрон» с квази-автоколлимационным ходом лучей на основе обращения волнового фронта объектной ветви и возможностью реализации в космических условиях

Контроль процессов юстировки заданного взаимного расположения СГЗ и вторичного зеркала предлагается реализовать на основе использования другого технического решения, изложенного в [12, 15]. При этом также предлагается применить выпуклое вторичное зеркало в качестве подложки соответствующих автоколлимационных осевых юстировочных СГОЭ. В данном случае юстировочные СГОЭ также могут быть реализованы в виде кольцевых голограмм либо в виде симметричных голограмм-сегментов (в виде парных сегментов — через 90 градусов или в виде тройных сегментов — через 120 градусов). Следует отметить, что изготовление этих юстировочных СГОЭ-сегментов усложняется с ростом крутизны рабочей поверхности вторичного зеркала, поэтому одним из возможных путей изготовления этих дифракционных структур — применение делительной техники маятникового типа [16 – 18].

В заключение важно отметить следующее:

- наибольшую актуальность и сложность представляет контроль процесса восстановления расчетной формы и подъюстировки сегментов СГЗ телескопов в ходе их эксплуатации в условиях космического базирования;

- предложенное АО «НПО ГИПО» техническое решение (датчик волнового фронта) на примере телескопа «Миллиметрон», основанное на использовании СГОЭ, нанесенного в краевой зоне выпуклого гиперболического вторичного зеркала, и обращения волнового фронта в объектной ветви лазерно-голографического интерферометра (квази-

автоколлимационный ход лучей), открывает возможность периодического мониторинга и выполнения процесса подъюстировки формы СГЗ в космических условиях;

– для обеспечения полной проработки предложенного решения (метода и устройства) с учетом численного и натурного моделирования необходимо выполнение комплексной НИОКР с участием Астрокосмического центра ФИАН, АО «НПО ГИПО» и других заинтересованных соисполнителей;

– одной из ключевых задач комплексной НИОКР является разработка и создание делительных машин нового типа, в том числе круговой — для формирования дифракционных структур СГОЭ на рабочих поверхностях вторичных зеркал диаметром до 2000 мм.

### Список источников

- [1] Астрокосмический центр ФИАН. Космическая обсерватория «Миллиметрон» / URL: <http://millimetron.ru>.
- [2] Космический телескоп «James Webb Space Telescope» / URL: <https://www.jwst.nasa.gov>.
- [3] Телескоп «Extremely Large Telescope» / URL: <http://www.elt.eso.org>.
- [4] Сравнение диаметров главных зеркал основных крупноформатных телескопов по состоянию на март 2021г. / URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison\\_optical\\_telescope\\_primary\\_mirrors.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_optical_telescope_primary_mirrors.svg).
- [5] **Бронштейн, Ю. Л.** Крупногабаритные зеркальные системы (контроль геометрии, юстировка) / Ю. Л. Бронштейн. — М.: ДПК Пресс, 2015. — 600 с.
- [6] **Лукин, А. В.** Новые возможности лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки крупноформатных составных зеркал телескопов / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 80 – 94.
- [7] **Лукин, А. В.** О возможностях лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки составного главного зеркала телескопа на примере космической обсерватории «Миллиметрон» / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, В. Н. Пышнов // Оптический журнал. — 2017. — Том 84. — № 12. — С. 45–49.
- [8] **Устинов, Н. Д.** Астрономический телескоп АСТ-1200 с составным главным зеркалом / Н. Д. Устинов, А. С. Васильев, Ю. П. Высоцкий, Б. Я. Гутников, И. И. Духопел и др. // Оптико-механическая промышленность. — 1985. — № 11. — С. 22–25.
- [9] **Канев, Ф. Ю.** Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования / Ф. Ю. Канев, В. П. Лукин. — Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. — 250 с.
- [10] **Патент на изобретение № 2375676 РФ.** Способ юстировки двухзеркальных центрированных оптических систем / В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. А. Нюшкин. — Заяв. 13.12.2007. — Опубл. 10.12.2009.
- [11] **Иванов, В. П.** Юстировка двухзеркальных центрированных оптических систем с использованием синтезированных голограммных оптических элементов / В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. А. Нюшкин // Оптический журнал. — 2010. — Том 77. — № 6. — С. 14–18.
- [12] **Балоев, В. А.** Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — № 3. — С. 56–64.
- [13] **Белозёров, А. Ф.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. 1 / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4 (46). — С. 12–32.

- [14] **Патент на полезную модель № 211189 РФ.** Голографическое устройство для контроля формы асферических оптических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов. — Заяв. 01.02.2022. — Оpubл. 25.05.2022.
- [15] **Патент на изобретение № 2467286 РФ.** Устройство юстировки двухзеркальной центрированной оптической системы / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов. — Заяв. 06.06.2011. — Оpubл. 20.11.2012.
- [16] **Патент на изобретение № 2691821 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 26.02.2018. — Оpubл. 18.06.2019.
- [17] **Melnikov, A.** New Technical Solutions in the Production Method of High-Aperture Ruled Diffraction Gratings / A. Melnikov, A. Lukin // The European Physical Journal Web of Conferences. — 2019. — Vol. 215. (EOS Optical Technologies, 2019). — 09003 / URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921509003>.
- [18] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475. — DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475

## **Possibilities of laser-holographic control of the processes of design form restoration and the preset positioning of the components of a large-format optical system in space-based conditions, on the example of the “Millimetron” telescope**

*A. V. Lukin, A. N. Melnikov, A. F. Skochilov*

JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

In this report we consider new schemes for laser-holographic control of the processes of design form restoration and the preset positioning of the components of a large-format optical system in space-based conditions using the “Millimetron” telescope as an example. Also, the features of their implementation are discussed. As an illustration, the spatial frequency characteristics of axial computer-generated hologram optical elements that perform the function of optical compensators are provided.

*Keywords:* Components of a large-format optical system, Design form restoration, Positioning, Laser-holographic control, Axial computer-generated hologram optical element, Space-based conditions, «Millimetron» Telescope.

# Применение фотополимера Bayfol HX для сжатия импульсов в ИК диапазоне

В. Н. Борисов, И. В. Жлуктова<sup>1</sup>, А. Д. Зверев<sup>1</sup>, В. А. Камынин<sup>1</sup>, М. С. Копьева<sup>1,2</sup>,  
В. В. Лесничий<sup>3</sup>, Р. А. Окунь<sup>1</sup>, В. Б. Цветков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>3</sup> Фрайбургский университет, Фрайбург, Германия

В работе исследован потенциал использования дифракционных элементов на базе голографического фотополимера Bayfol HX в ближнем инфракрасном диапазоне. Показано, что модуляция показателя преломления не уменьшается в инфракрасном диапазоне по сравнению с видимым. Показано нарушение закона взаимозаместимости при масштабировании периода голограммы от 414 до 2100 нм. Создан компрессор чирпированных импульсов с центральной длиной волны вблизи 1,06 мкм и шириной спектра  $\approx 8$  нм на основе голографических решеток, записанных в фотополимере Bayfol HX 200.

*Ключевые слова:* Голография, Bayfol, фотополимер, ИК излучение, оптический компрессор.

*Цитирование:* **Борисов, В. Н.** Применение фотополимера Bayfol HX для сжатия импульсов в ИК диапазоне / В. Н. Борисов, И. В. Жлуктова, А. Д. Зверев, В. А. Камынин, М. С. Копьева, В. В. Лесничий, Р. А. Окунь, В. Б. Цветков // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 151–153.

## Введение

На сегодняшний день одним из наиболее коммерчески успешных голографических материалов позволяющих создавать низкоселективные дифракционные элементы является Bayfol HX [1, 2]. Однако на данный момент абсолютное большинство применений этого материала ограничено видимым диапазоном длин волн. Основной целью данной работы – изучить возможность применения голографических элементов, записанных в фотополимере Bayfol HX, в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне (длина волны 1–2 мкм).

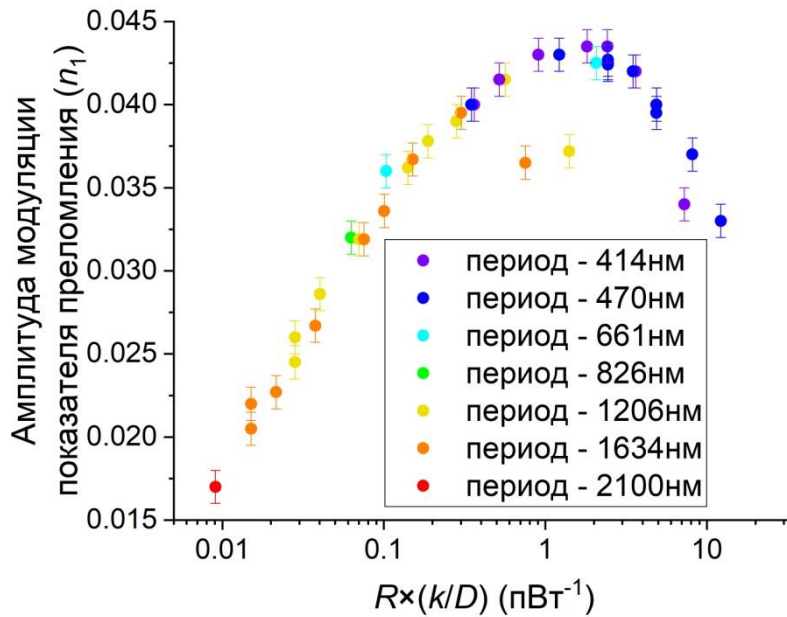
## Задачи исследования и методы

Первой задачей работы стало изучение модуляции показателя преломления фотополимера в ИК диапазоне и распределение динамического диапазона показателя преломления между гармониками в зависимости от условий записи. Анализ влияния условий записи проводился с использованием модели полимеризации и линейной диффузии в фотополимерах [3], с применением измененной формулы отношения скоростей диффузии и полимеризации:

$$R^* \frac{k}{D} = \frac{K^2}{I},$$

где  $K$  – длина вектора решетки,  $I$  – средняя интенсивность записывающего излучения в материале,  $k$  и  $D$  – материальные константы, описывающие скорости диффузии и полимеризации. Сопоставлены модуляция первой гармоники показателя преломления в ИК области ( $n_1$ ) с условиями записи (рис. 1).





**Рис. 1.** Распределение  $n_1$  записанных голограмм от отношения квадрата длины вектора решетки к средней интенсивности записывающего излучения

Вторая задача – разработка оптического компрессора оптимизированного для импульсного волоконного Yb-лазера с центральной длиной волны вблизи 1.06 мкм и шириной спектра  $\approx 8$  нм. Рассчитаны характеристики дифракционных элементов, габариты и дисперсия компрессора, приводятся экспериментальные результаты по сжатию импульсов в разработанном компрессоре.

### Заключение

В работе показано, что модуляция показателя преломления голограмм значимо не уменьшается в ближнем ИК диапазоне по сравнению с видимым диапазоном спектра. В частности, фотополимер позволяет получать голограммы с эффективностью  $> 97\%$  на длинах волн восстановления около 1.55 мкм, что делает его привлекательным материалом для изготовления дифракционной оптики, в том числе, для телекоммуникационных применений. В работе установлены оптимальные условия для записи голограмм с наиболее сильным первым порядком дифракции для широкого диапазона периодов (414–1634 нм). Результаты исследования позволили разработать оптический компрессор chirпированных импульсов для волоконного Yb-лазера.

### Список источников

- [1] **Marín-Sáez, J.** Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications / J. Marín-Sáez, J. Atencia, D. Chemisana, M.-V. Collados // Optics Express. — 2016. — Vol. 24. — Issue 6 — P. A720–A730. — DOI:10.1364/OE.24.00A720.
- [2] **Putilin, A. N.** Holographic Waveguide Periscopes in Augmented Reality Displays / A. N. Putilin, A. V. Morozov, S. S. Kopenkin, S. E. Dubynin, Yu. P. Borodin // Optics and Spectroscopy. — 2020. — Vol. 128. — № 11 — P. 1828–1836. — DOI: 10.1134/S0030400X2011020X.

- [3] **Sheridan, J. T.** Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer / J. T. Sheridan, J. R. Lawrence // Optical Society of America. — 2000. — Vol 17. — № 6. — P. 1108–1114. — DOI:10.1364/JOSAA.17.001108.

## **Bayfol HX photopolymer for pulse compression in the IR range applications**

*V. N. Borisov, I. V. Zhluktova<sup>1</sup>, A. D. Zverev<sup>1</sup>, V. A. Kamynin<sup>1</sup>, M. S. Kopyeva<sup>1,2</sup>, V. V. Lesnichii<sup>3</sup>, R. A. Okun<sup>1</sup>, V. B. Tsvetkov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Albert Ludwig University of Freiburg, Freiburg, Germany

The potential of using diffractive elements based on the Bayfol HX holographic photopolymer in the near infrared range has been studied in this work. It is shown that the modulation of the refractive index does not decrease in the infrared spectral range compared to the visible range. A violation of the reciprocity is shown with scaling of the hologram period from 414 to 2100 nm. A compressor for chirped pulses with a central wavelength near a 1.06 mkm and a spectral width of 8 nm has been created based on holographic gratings recorded in a Bayfol HX 200 photopolymer.

*Keywords:* Holography, Bayfol, photopolymer, IR radiation, optical compressor.

# Делительные машины маятникового типа — новые перспективные средства прецизионного формирования с наноразмерной точностью периодических штриховых структур на поверхностях с большой стрелкой прогиба

*А. Н. Мельников*

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассматриваются принципы построения и функционирования делительных машин маятникового типа, при помощи которых возможно увеличить номенклатуру и область применения дифракционных оптических элементов с периодическими штриховыми структурами на поверхностях с большой стрелкой прогиба.

*Ключевые слова:* Делительная машина маятникового типа, Прецизионное формирование, Дифракционный оптический элемент, Периодическая штриховая структура, Поверхность с большой стрелкой прогиба, Решетка-матрица, Полимерная пленка, Контроль формы, Обращение волнового фронта.

*Цитирование:* Мельников, А. Н. Делительные машины маятникового типа — новые перспективные средства прецизионного формирования с наноразмерной точностью периодических штриховых структур на поверхностях с большой стрелкой прогиба / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 154–156.

На основе применения делительных машин маятникового типа (ДММТ) в силу особенностей кинематики и динамики их делительных и маятниковых резовых кареток, что обуславливает преимущества ДММТ по сравнению с классическими делительными машинами, открываются возможности увеличения номенклатуры изготавливаемых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с периодическими штриховыми структурами на поверхностях с большой стрелкой прогиба:

- для спектроскопического применения [1 – 6];
- для решения задач концентрации излучения или освещения на основе использования крупноформатных концентрирующих или осветительных оптических систем – крупноформатных линейных синтезированных голограмм-реплик, получаемых на тонких полимерных пленках путем прецизионного реплицирования или тиснения при помощи синтезированных голограмм-матриц цилиндрической формы [2, 4, 7, 8];
- для решения задач компрессии-декомпрессии мощных лазерных импульсов на основе относительно дешевых «одноразовых» крупноформатных дифракционных решеток-реплик в виде тонких полимерных пленок, формируемых путем прецизионного реплицирования или тиснения при помощи дифракционных решеток-матриц цилиндрической формы;
- для решения задач контроля формы рабочих поверхностей внеосевых сегментов вогнутых асферических зеркал и линз на основе использования синтезированных голограмм,

изготовленных на цилиндрических поверхностях, позволяющих реализовать квази-автоколлимационный ход лучей с обращением волнового фронта в объектной ветви лазерно-голографической контрольной схемы [9, 10].

В докладе рассматриваются подробно принципы построения и функционирования ДММТ в контексте с указанными перспективными применениями ДОО с периодическими штриховыми структурами на поверхностях с большой стрелкой прогиба.

### Список источников

- [1] **Патент на изобретение № 2691821 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 26.02.2018. — Оpubл. 18.06.2019.
- [2] **Патент на изобретение № 2687515 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на выпуклых цилиндрических поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Заяв. 27.02.2018. — Оpubл. 14.05.2019.
- [3] **Мельников, А. Н.** Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа / А. Н. Мельников // Фотоника. — 2019. — Том 13. — № 5. — С. 468–475. — DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475
- [4] **Патент на изобретение № 2725324 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на вогнутых поверхностях / А. Н. Мельников. — Заяв. 31.05.2019. — Оpubл. 02.07.2020.
- [5] **Бажанов, Ю. В.** Новые возможности получения неклассических нарезных дифракционных решеток большой апертуры / Ю. В. Бажанов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2021. — Том 88. — № 9. — С. 44–51. — DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-09-44-51
- [6] **Мельников, А. Н.** Новый подход в задаче формообразования тороидальных дифракционных решёток / А. Н. Мельников // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научн. трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. — С. 181–182.
- [7] **Лукин, А. В.** Возможности изготовления эффективной цилиндрической голограммной оптики при помощи делительных машин маятникового типа / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2018: XV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — С. 197–198.
- [8] **Мельников, А. Н.** Возможности и перспективы организации промышленного выпуска высокоэффективных концентраторов солнечного излучения в виде матрицы тонких цилиндрических голограммных линз / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021 — С. 310–311.
- [9] **Патент на полезную модель № 211189 РФ.** Голографическое устройство для контроля формы асферических оптических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов. — Заяв. 01.02.2022. — Оpubл. 25.05.2022.
- [10] **Лукин, А. В.** Новые возможности лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки крупноформатных составных зеркал телескопов / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 80 – 94.

# **Pendulum-type ruling engines: new promising means of precision forming with nanoscale accuracy of periodic grooved structures on surfaces with large sag height**

*A. N. Melnikov*

JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

This report considers the principles of construction and functioning of pendulum-type ruling engines, which can be used to increase the nomenclature and range of application of diffraction optical elements with periodic grooved structures on surfaces with large sag height.

*Keywords:* Pendulum-type ruling engine, Precision forming, Diffraction optical element, Periodic grooved structure, Surface with large sag height, Master grating, Polymer film, Shape inspection, Phase conjugation.

# Отражательные брэгговские решетки на ФТР стекле: влияние геометрии элемента на его брэгговские параметры

Ю. Л. Корзинин

Филиал АО НПК «Системы Прецизионного Приборостроения» в г. Санкт-Петербурге

Обнаружено влияние соотношения геометрических размеров брэгговской решетки зарегистрированной в фото-термо-рефрактивном стекле (ФТР) на брэгговские условия ее считывания. Сформулирована гипотеза, объясняющая наблюдаемый эффект.

*Ключевые слова:* Объемная брэгговская решетка, Брэгговское зеркало, Фото-термо-рефрактивное стекло, Брэгговская длина волны.

*Цитирование:* Корзинин, Ю. Л. Отражательные брэгговские решетки на ФТР стекле: влияние геометрии элемента на его брэгговские параметры / Ю. Л. Корзинин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 157–159.

## Введение

При изготовлении голографических объемных брэгговских решеток (БР) на ФТР разной геометрической формы было замечено различие их брэгговских длин волн при прочих равных условиях записи и термообработки. Было высказано предположение, что геометрическая форма БР на ФТР при прочих равных условиях влияет на ее брэгговские параметры.

## Изготовление экспериментальных образцов БР

Для подтверждения данного предположения были изготовлены полированные пластины ФТР стекла размером  $17 \times 26 \times 2,4$  мм. Каждая пластина экспонировалась интерференционной картиной двух плоских пучков (длина волны 325 нм) сформированных по стандартной голографической двухлучевой схемой. Степень равномерности экспозиции по полю пластины не хуже 90 %. Соотношение интерферирующих пучков близко к 1:1.

После экспозиции пластины разрезались вдоль плоскостей пучностей интерференционной картины на прямоугольные элементы, торцы которых полировались. В результате получались отражательные БР с одинаковыми шириной ( $L=11,5$  мм) и высотой ( $H=2,4$  мм), но разной толщиной (глубиной). Из каждой пластины изготавливались 6 БР: по две решетки с толщинами  $T=5$  мм,  $2,5$  мм,  $1,3$  мм (рис. 1.).

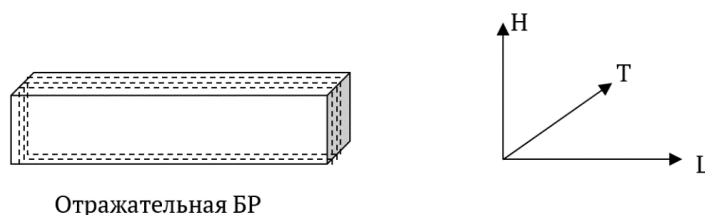


Рис. 1. Отражательная брэгговская решетка

После изготовления все БР помещались одновременно в печь на термообработку. Тем самым обеспечивались одинаковые условия термообработки для всех БР.

Таким образом были обеспечены равенство основных параметров для всех решеток.

### Измерение брэгговской длины волны и результаты

Для измерения брэгговской длины волны полученных решеток использовалась лазерная фотодиодная линейка (ФД), излучение которой коллимировалось по быстрой оси цилиндрической линзой (Л), а в качестве выходного зеркала устанавливалась изготовленная БР. Излучение, прошедшее БР попадало в спектрометр и регистрировался его спектр.

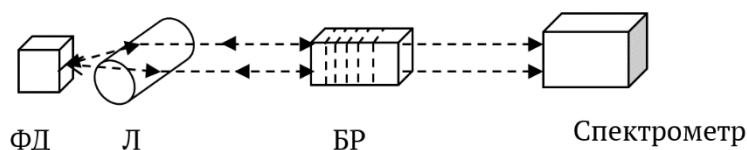


Рис. 2. Схема стенда измерения

БР поворотами вокруг горизонтальной и вертикальной оси настраивалась до максимальной выходной мощности генерации, что обеспечивало нормальное падение излучения ФД на изофазные плоскости решетки. В качестве примера ниже в таблице 1 приведены измеренные значения длин волн генерации системы ФД с решетками вырезанными из двух пластин.

Таблица 1. Измеренные значения длин волн генерации

Толщина БР, мм	Пластина 1: Брэгговская длина волны		Пластина 2: Брэгговская длина волны		Средняя брэгговская длина волны
	Решетка 1	Решетка 2	Решетка 3	Решетка 4	
5	780,06 нм	780,1 нм	780,1 нм	780,04 нм	<b>780,075 нм</b>
2,5	780,31 нм	780,31 нм	780,31 нм	780,36 нм	<b>780,32 нм</b>
1,3	780,57 нм	780,57 нм	780,53 нм	780,57 нм	<b>780,56 нм</b>

Из приведенных в таблице данных видно, что брэгговская длина волны растет с уменьшением толщины (глубины) решетки.

### Гипотеза

Термообработка голографических элементов на ФТР проходит при температурах выше температуры стеклования стекла (ТЖ). При этом стекло пребывает в пластичном состоянии и под действием сил поверхностно натяжения деформируется (в нашем случае усаживается по глубине). При этом величина (коэффициент) усадки тем выше, чем дальше стекло находится при температуре выше ТЖ. Образцы больших габаритов остывают медленнее и более длительное время пребывают при температуре выше ТЖ и как следствие воздействие

сил поверхностного натяжения на них более длительно, что приводит к большим коэффициентам усадки, что в свою очередь ведет к уменьшению брэгговской длины волны.

## **Reflecting Bragg Gratings on PTR Glass: Effect of Element Geometry on Its Bragg Parameters**

*Yu. L. Korzinin*

Branch of JSC SPC Precision Instrumentation Systems in St. Petersburg

The influence of the ratio of the geometric dimensions of the Bragg grating recorded in photo-thermo-refractive glass (PTR) on the Bragg reading conditions is found. A hypothesis is formulated to explain the observed effect.

*Keywords:* Volume Bragg grating, Bragg mirror, photo-thermo-refractive glass, Bragg wavelength.



## Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов

А. В. Морозов<sup>1,2</sup>, С. Е. Дубынин<sup>1,2</sup>, А. Н. Путилин<sup>2</sup>, С. С. Копенкин<sup>2,3</sup>, Ю. П. Бородин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> РТУ МИРЭА, Москва, Россия

В работе представлены комбинированные оптические элементы на основе голографических оптических элементов (ГОЭ) и световода для преобразования коллимированного пучка от когерентного источника излучения с, как правило, гауссовым распределением энергии во flat-top пучок с увеличенными размерами и заданной формой поперечного сечения. Отличительной особенностью данных комбинированных оптических элементов является уменьшение спекловой структуры при сохранении когерентности излучения. Авторами предложены несколько модификаций таких элементов. Была достигнута суммарная эффективность таких элементов 40–45% (дифракционная эффективность отдельных ГОЭ порядка 80–85%) при однородности пучка около 80% и снижении контраста спеклов до уровня 20–30%.

*Ключевые слова:* Голографический оптический элемент, Расширитель пучка, Когерентная система подсветки, Дополненная реальность, Голографический экран.

*Цитирование:* Морозов, А. В. Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов / А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин, Ю. П. Бородин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 160–164.

В настоящее время к голографическим средствам визуализации информации, а также входящим в их состав системам подсветки и расширения пучка, предъявляются такие требования как минимизация размера устройства (в особенности важно уменьшение толщины устройства), повышение эффективности при придании однородности и создании определенной формы поперечного сечения (апертуры) пучка оптического излучения, а также снижение контрастности (подавление) спеклов [1].

Представленные комбинированные оптические элементы являются составной частью модуля когерентной подсветки голографического дисплея [1-2]. Основным назначением данного оптического компонента является преобразование пучка от компактного источника когерентного излучения в пучок с заданной формой и размером поперечного сечения (рисунок 1) с тем, чтобы после многократного размножения в световоде осветить пространственно-временной модулятор света (ПВМС) однородным, плоским волновым фронтом и сформировать четкое изображение без искажений.

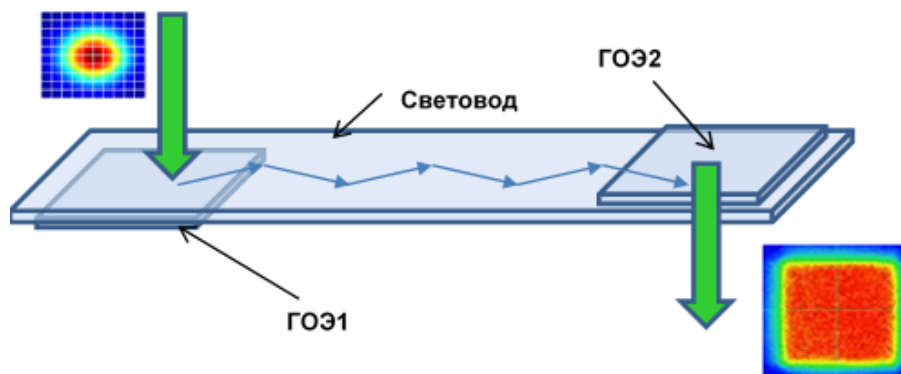


Рис. 1. Схема

В качестве источника излучения предлагается использование полупроводниковых лазерных диодов, пучок которых после коллиматора, как правило, имеет эллиптическое сечение и Гауссово распределение энергии. В качестве регистрирующей среды для ГОЭ используется фотоматериал Covestro Bayfol толщиной 5...40 мкм. Наиболее оптимальной была выбрана толщина 16 и 25 мкм, поскольку при меньших значениях существенно снижается дифракционная эффективность (ДЭ), а при больших значениях значительно возрастает шумовая составляющая и возрастает влияние усадки.

На первом этапе была реализована оригинальная идея с волноводным перископом, в который был интегрирован рассеиватель. Длина световода составляла 100 мм или 70 мм между центрами ГОЭ1 и ГОЭ2. ГОЭ1 представлял собой отражательную объемную решетку, которая регистрировалась на материале непосредственно на волноводе (без последующего переноса) и осуществляла ввод излучения в световод и фокусировку излучения после 17 переотражений в плоскости ГОЭ2.

Затем с помощью оптического УФ-отверждаемого полимера на поверхности световода напротив ГОЭ1 фиксировался рассеиватель. В качестве рассеивателя использовались матовые рассеиватели с индикатрисой  $0,5^\circ$ ,  $1,0^\circ$ ,  $2,0^\circ$ ,  $5,0^\circ$  и микролинзовые растрсы, у которых диаметр линз был равен фокусному расстоянию и составлял 300 и 500 мкм. Со стороны рассеивателя на другом конце световода накатывался фотоматериал и через рассеиватель и ГОЭ1 регистрировалась согласованная ГОЭ1 в виде отражательной объемной решетки. В качестве опорного использовался коллимированный пучок. Таким образом, рассеиватель и ГОЭ1 формируют в плоскости ГОЭ2 множество точечных источников, а ГОЭ2 в свою очередь выводит излучение из световода, формирует коллимированный пучок от каждого такого источника и замешивает их. Наилучший результат был достигнут при использовании матового рассеивателя с индикатрисой  $2,0^\circ$  и  $5,0^\circ$  (рисунок 2).



а) расширитель пучка для длины волны 532 нм

б) шумы эффективно удаляются поляризатором

**Рис. 2.** Расширитель пучка

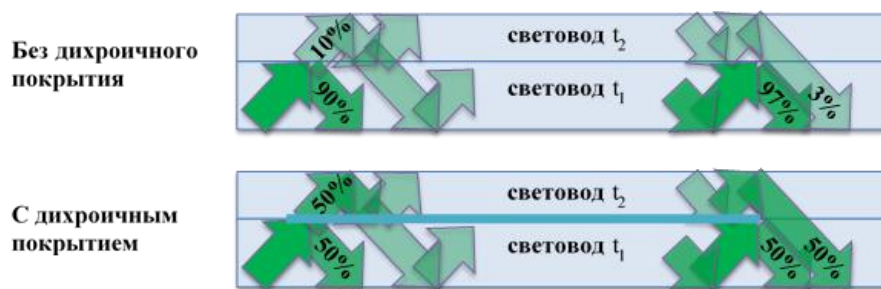
Данный вариант расширителя пучка эффективно справляется с поставленной задачей, однако, обладает целым рядом недостатков, к которым можно отнести:

- низкая энергетическая эффективность – ГОЭ2 для моноцвета имеет ДЭ всего около 20% при высокой ДЭ ГОЭ1 и малых потерях световода;

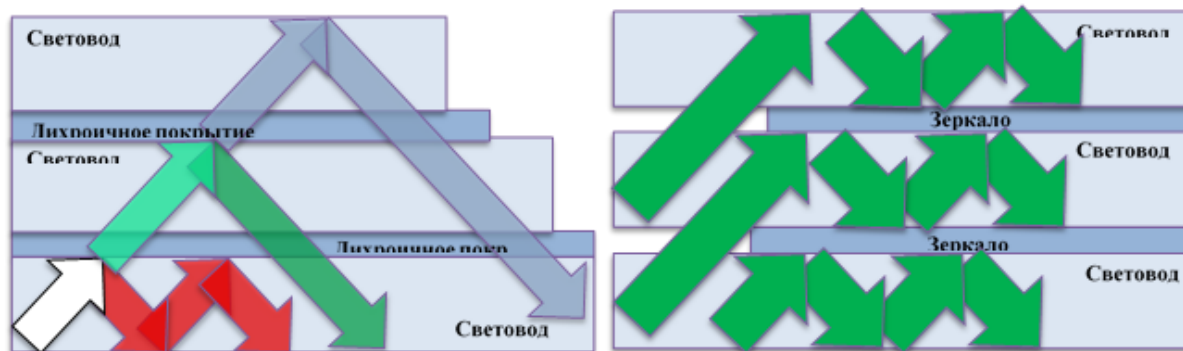
- для каждой длины волны требуется свой расширитель пучка, если речь идет о полноцветном голографическом экране; запись объемных решеток для нескольких длин волн возможна, но ДЭ в этом случае кратно снижается и появляются шумы от дифракции одной длины волны на каждой из решеток;

- усадка материала легко компенсируется в случае с ГОЭ1, но проблемы начинаются из-за усадки ГОЭ2 и как результат рассогласование ГОЭ2 и рассеивателя.

Поскольку переход к полноцветному варианту в данном случае ведет к незначительному, но все же увеличению толщины, была предложена новая более простая и эффективная идея – использовать многослойный волновод с различной толщиной слоев и разделительными дихроичными покрытиями между ними. ГОЭ1 и ГОЭ2 в данном случае выполнены как объемные отражательные решетки и работают как элементы связи с волноводом для ввода/вывода излучения. Данное решение предполагает широкий выбор вариантов реализации: дихроичные покрытия могут быть с частичным пропусканием или полностью зеркальным, а также селективными по длине волны (рисунок 3).



а) диxpoичное покpытие с частичным пропусканием



б) диxpoичное покpытие селективное по длине волны

в) зеркальное покpытие

Рис. 3. Идея использования многослойного волновода

Количество слоев позволяет существенно сократить продольный размер (рисунок 4). Толщины слоев - не произвольные величины, а являются результатом оптимизации.

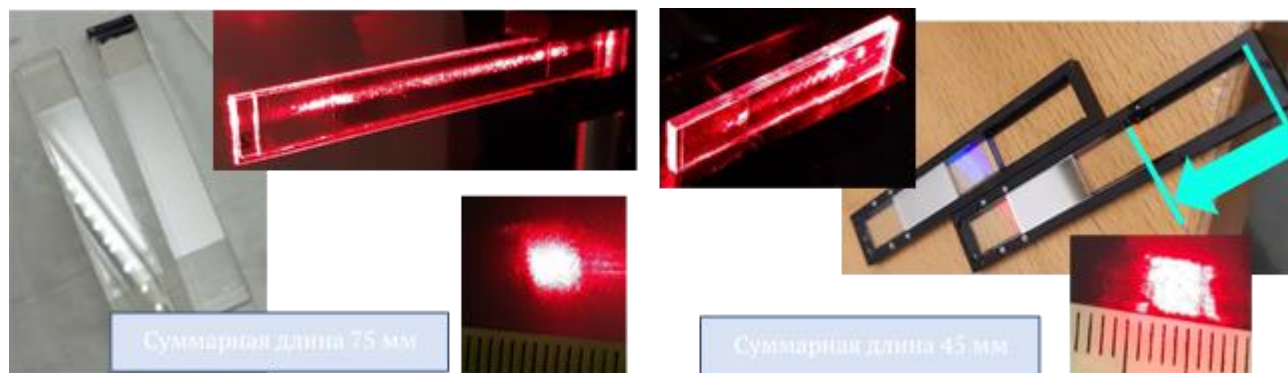


Рис. 4. Влияние количества волноводов на продольный габарит и качество

Применение данных расширителей пучка не ограничивается лишь голографическими экранами – это может быть внедрено в VR/AR-устройствах (в первую очередь носимых), HUD, оптических датчиках (как пример – дактилоскопических) и других. Данные решения отражены в ряде патентов [3-6].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Jungkwuen An** Slim-panel holographic video display / Jungkwuen An, Kanghee Won, Young Kim, Jong-Young Hong, Hojung Kim, Yongkyu Kim, Hoon Song, Chilsung Choi, Yunhee Kim, Juwon Seo, Alexander Morozov, Hyunsik Park, Sunghoon Hong, Sungwoo Hwang, Kichul Kim & Hong-Seok Lee // Nature Communications 11(1), (2020)
- [2] **Chil-Sung Choi** Compact coherent backlight unit for portable holographic display / Chil-Sung Choi, Sung-Hoon Lee, Hoon Song, Jungkwuen An, Alexander Morozov, German Dubinin, Yunhee Kim, Young Kim, Kang-Hee Won, Yongkyu Kim, Myungjae Jeon, Bongsu Shin, Chang-Kun Lee, Wontaek Seo, Jae-Seung Chung, Juwon Seo, Yun-Tae Kim, Geeyoung Sung, Sunil Kim, Hong-Seok Lee // Proc. SPIE 11089, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVI, 1108902 (3 September 2019)
- [3] **Патент № 2 762 176 РФ.** Устройство для расширения пучка оптического излучения и способ расширения пучка оптического излучения для когерентной подсветки / А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, Г. Б. Дубинин, А. Н. Путилин, Хун СОН, Хон-Сеок ЛИ, Чил-Сун ЧОЙ, — Оpubл. 16.12.2021.
- [4] **Патент № 3 943 996 EP.** Beam expander and method of operating the same / A. V. Morozov, A. N. Putilin, S. E. Dubynin, Chilsung Choi, G. B. Dubinin, Hongseok Lee, Hoon Song, — Оpubл. 26.01.2022.
- [5] **Патент № 2 757 071 РФ.** Устройство для расширения пучка оптического излучения для когерентной подсветки с набором световодов с дихроичными покрытиями / А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, Г. Б. Дубинин, Хун СОН, Хон-Сеок ЛИ, Чил-Сун ЧОЙ, — Оpubл. 11.10.2021.
- [6] **Патент № 2022/0 146 764 US.** Beam expander and beam expansion method / A. V. Morozov, S. E. Dubynin, G. B. Dubinin, Chilsung Choi, Hongseok Lee, Hoon Song, — Оpubл. 12.05.2022.

## Beam expander for coherent illumination and speckle reduction

*A. V. Morozov<sup>1,2</sup>, S. E. Dubynin<sup>1,2</sup>, A. N. Putilin<sup>2</sup>, S. S. Kopenkin<sup>2,3</sup>, Y. P. Borodin<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> MIREA, Moscow, Russia

The paper presents the combined optical elements based on holographic optical elements (HOE) and a lightguide for achievement of flat-top beam with enlarged dimensions and a required cross-sectional shape from collimated coherent beam with a Gaussian energy distribution. A distinctive feature of these beam shapers is the reduction of the speckle structure while maintaining the coherence of the radiation. The authors have proposed several modifications of such elements. The total efficiency of such elements was achieved by 40–45% (the diffraction efficiency of individual elements is about 80–85%) with a beam uniformity of about 80% and a decrease in speckle contrast to the level of 20–30%.

*Keywords:* Holographic optical element, Waveguide, Lightguide, Beam expander, Beam shaper, Speckle reducing.

# Световодный оптический комбинер на фото-термо-рефрактивном стекле с брэгговскими решетками для нашиваемых дисплеев

С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты разработки световодного комбинера на фото-термо-рефрактивном стекле для систем дополненной и смешанной реальности. Ввод/вывод изображения в волновод обеспечен с помощью объемных высокоселективных решеток Брэгга. Установлено, что при использовании дисплея с шириной линии зеленого цвета в 90 нм одна Брэгговская пропускающая решетка толщиной 2 мм передает угловое поле в 4 градуса. Продемонстрирована работа световодного комбинера с портативным проектором.

*Ключевые слова:* Дифракция, брэгговская решетка, волновод, фото-термо-рефрактивное стекло, дополненная реальность

*Цитирование:* **Иванов, С. А.** Световодный оптический комбинер на фото-термо-рефрактивном стекле с брэгговскими решетками для нашиваемых дисплеев / С. А. Иванов, Е. С. Мусихина, Н. В. Никоноров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 165–167.

## Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется технологиям расширенной реальности. Особый интерес представляют устройства, где в качестве комбинера используются волноводы с дифракционным вводом и выводом излучения. Для ввода и вывода излучения могут использоваться дифракционные решетки любого типа, в том числе и голографические. Известны варианты реализации волноводных систем для технологий расширенной реальности на голограммах на тонких полимерных пленках и на объемных голограммах, записанных так же на полимерных материалах [1]. Однако, подобные системы не получили распространения главным образом из-за необходимости нанесения защитных покрытий на полимерные пленки и низкой селективности голограмм малой толщины. Также стоит отметить, что материалы, которые используются для записи голограмм, не являются волноводами.

В настоящей работе рассмотрена концепция волновода, который является голографической средой. Соответственно, решетки ввода/вывода записаны в самом волноводе и являются его частью.

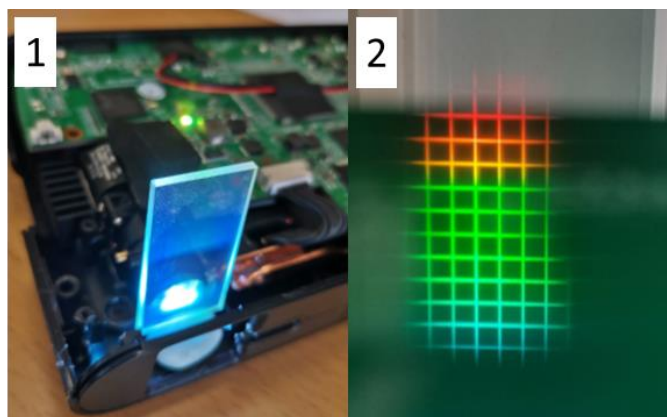
## 1. Используемые методы и подходы

Для проведения эксперимента на базе научно-исследовательского центра оптического материаловедения университета ИТМО было синтезировано фото-термо-рефрактивное стекло [2]. Синтез стекла производился в высокотемпературной лабораторной печи Carbolite GERO при температуре 1440°C в платиновом тигле. Перемешивание расплава осуществлялось

платиновой мешалкой. Отжиг стекла производился в муфельной печи в течение 10 ч при температуре 485°C. Для проведения эксперимента были изготовлены пластины 40×20×2 мм. Поверхность образцов была предварительно отшлифована и отполирована. Запись решеток в ФТР стекле осуществлялась путем облучения стекла излучением гелий-кадмиевого лазера Kimmon K Series IK3501R-G с длиной волны излучения 325 нм. Проявление голограмм осуществлялось с помощью термообработки в муфельной печи Nabertherm N11/2 при температуре ~500°C в течение 6 часов. Нагрев печи производился со скоростью 5°C в минуту. Дифракционная эффективность решеток ввода/вывода измерялась с использованием лазерного диода с длиной волны 532 нм.

## 2. Результаты

Как известно, в системах дополненной реальности на основе волноводной пластины и решеток ввода/вывода падающий конус лучей, который содержит в себе заданное поле зрения, поворачивается решетками. Этот поворот осуществляется таким образом, чтобы все лучи, лежащие внутри конуса, попадали под условие полного внутреннего отражения внутри волновода. Этот поворот может быть сделан как с применением отражательных, так и пропускающих решеток. Дополнительно, решетки должны быть наклонены на определенный угол внутри среды по отношению к поверхности. В ходе расчета было установлено, что предпочтительной с точки зрения записи является пропускающая геометрия, где все решетки имеют переменный угол наклона и равные периоды. Первый образец волновода состоял только из одной решетки ввода и вывода, а расстояние между входной и выходной областями составило 15 мм. Процедура термообработки была сокращена по сравнению с традиционным режимом для данного вида стекла, что должно было снизить рассеяние в записанных голограммах. Кроме того, была применена процедура обесцвечивания решеток для удаления желтой окраски пластины. После процедуры пропускание пластины составило более 80% по всему видимому диапазону, при этом 8% потерь приходится на отражения. Согласно измерениям, одна решетка в пластине толщиной 2 мм обеспечивает передачу поля зрения в 4 градуса.



1 — волновод, установленный перед DLP-проектором; 2 — изображение, полученное при помощи волновода

**Рис. 1.** Результат проверки работоспособности системы

Примечательно, что по второй координате решетка обеспечивает поле в 7 градусов. Модуляция показателя преломления в такой решетке составляет  $0,6 \times 10^{-4}$ , в то время как динамический диапазон ФТР стекла превышает  $10 \times 10^{-4}$ . Таким образом, очевидно, что потенциал мультиплексирования таких решеток превышает 15 шт, что эквивалентно полю зрения в 60 градусов. Стоит отметить, что дифракционная эффективность одиночной решетки, составила 61%, измеренная узкополосным источником. В то же время эффективность решетки при работе с широкополосным источником составила 15%. На рис. 1 (справа) представлена демонстрация работы системы с портативным проектором.

### **Заключение**

В работе был проведен анализ оптимальной конфигурации решеток ввода/вывода. Выбран оптимальный вариант с точки зрения записи. В результате записан волновод с решетками ввода/вывода в нескольких исполнениях. Продемонстрирована работа волновода с использованием коммерчески доступного DLP-проектора. Показано, что одна решетка в пластине толщиной 2 мм обеспечивает поле зрения в 4 градуса. При этом по второй координате решетка обеспечивает поле в 7 градусов. Потенциал мультиплексирования таких решеток можно оценить в 15 шт. что эквивалентно полю зрения в 60 градусов.

### **Благодарность**

Работа выполнена при поддержке Программы развития ИТМО-2030.

### **Список источников**

- [1] **Kress, B. C.** Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective / B. C. Kress, I. Chatterjee // Nanophotonics. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – С. 41–74.
- [2] **Nikonorov, N.** New Photo-ThermoRefractive Glasses for Holographic Optical Elements: Properties and Applications / N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, A. Ignatiev // Holographic Materials and Optical Systems. – InTech, 2017. – Pp. 435–461

## **Waveguide-based optical combiner on photo-thermo-refractive glass with Bragg grating for head up displays**

*S. A. Ivanov, E. S. Musikhina, N. V. Nikonorov*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

This paper presents the results of the development of a waveguide combiner on photo-thermo-refractive glass for augmented and mixed reality systems. The input/output of the image into the waveguide is provided with highly selective volume Bragg gratings. It was found that when using a display with a green color width of 90 nm, one transmission Bragg grating with a thickness of 2 mm transmits an angular field of view of 4 degrees. Operation of a waveguide combiner with a portable projector is demonstrated.

*Keywords:* Diffraction, Bragg grating, waveguide, photo-thermo-refractive glass, augmented reality.



# Осевая голограмма в системах дополненной реальности

А. А. Калинина<sup>1</sup>, А. Н. Путилин<sup>2</sup>, С. С. Копёнкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технологический институт «МФТИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н.Лебедева, РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Россия

Обычно, в системах дополненной реальности используются внеосевые голограммы для переноса изображения, что обеспечивает широкое поле зрения системы, высокую эффективность, а также компактность. Главным недостатком таких систем является небольшой размер выходного зрачка, порядка 1мм, что ограничивает использование подобных систем в реальных устройствах. Для достижения широкого поля зрения и большого выходного зрачка одновременно, предлагается использовать осевую голограмму. В данной работе рассмотрены особенности формирования виртуального изображения в системах дополненной реальности с осевой голограммой, предложена реализация системы в качестве очков дополненной реальности, а также представлены результаты экспериментов. Предложенная система обладает полем зрения более 50° и диаметром выходного зрачка более 10 мм.

*Ключевые слова:* Дополненная реальность, Очки дополненной реальности, Голографические оптические элементы.

*Цитирование:* Калинина, А. А. Осевая голограмма в системах дополненной реальности / А. А. Калинина, А. Н. Путилин, С. С. Копёнкин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 168–171.

## Введение

Многие исследования показывают, что использование внеосевых голограмм в устройствах дополненной реальности позволяет достичь поля зрения более 90° [1,2]. Однако, такие системы всегда имеют ограниченный выходной зрачок – не более 1 мм диаметром. Данная работа посвящена поиску таких свойств голограмм, которые смогли бы обеспечить формирование виртуального изображения одновременно в широком поле зрения и с большим выходным зрачком. Проведенные исследования показывают, что свойства осевой голограммы способны обеспечить вышеупомянутые требования. В данной работе рассматриваются свойства осевых голограмм, а также описывается конфигурация очков дополненной реальности с использованием осевой голограммы.

### 1. Свойства осевой голограммы

Особенность голографических оптических элементов заключается в том, что при восстановлении волнового фронта может использоваться волна, отличающаяся от исходной волны, используемой при записи. Для того, чтобы сформировать виртуальное изображение в системе дополненной реальности в широком поле зрения и с большим выходным зрачком, мы предлагаем использовать схему с осевой отражательной фазовой голограммой. Положение точек записи голограммы  $Y_1Z_1$  и  $Y_2Z_2$  совпадают (Рис. 1).

$$S_R = S_O, \quad (1)$$

где  $S_R$  – расстояние от плоскости голограммы до точки записи опорной волны,  $S_O$  расстояние от плоскости голограммы до точки записи объектной волны.

Данное условие формирует плоское промежуточное изображение у голограммы. Промежуточное изображение – это плоскость, в которой сходятся пучки, при освещении голограммы коллимированными пучками. В случае внеосевых схем – промежуточное изображение обладает изогнутой асимметричной формой. В случае осевой голограммы с концентрическим положением точек записи опорной и объектных волн промежуточное изображение – плоское и находится на расстоянии  $S_i$  от голограммы.

Таким образом, если расположить источник изображения в плоскость промежуточного изображения голограммы, то расходящиеся от объекта сферические пучки преобразуются в параллельные и формируют выходной зрачок (рис.2). При этом величина выходного зрачка будет зависеть только от угла расхождения излучения у излучающего объекта, а поле зрения системы – от продольных размеров голограммы и угловой апертуры опорной и объектной волн.

Моделирование системы выполнялось в среде OpticsStudio, с использованием типа поверхности голограммы «Optically Fabricated Hologram». Диаметр зеркала был выбран 80 мм, радиус кривизны  $R = -63,2$  мм, материал подложки BK7, регистрирующая среда Baufol HX200 16 мкм, длина волны источника  $\lambda=514$  нм, расстояния  $S_R = S_O = 41,845$ мм. В этом случае расстояние от голограммы до промежуточного изображения составило  $S_i = 20,16$ мм.

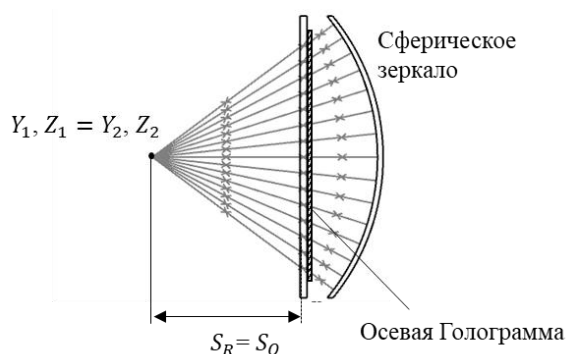


Рис. 1. Схема записи осевой голограммы

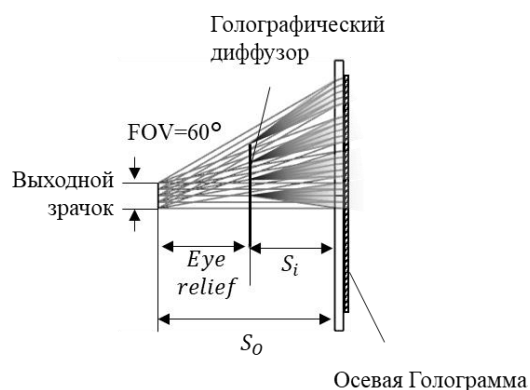


Рис. 2. Схема восстановления волнового фронта из плоскости промежуточного изображения

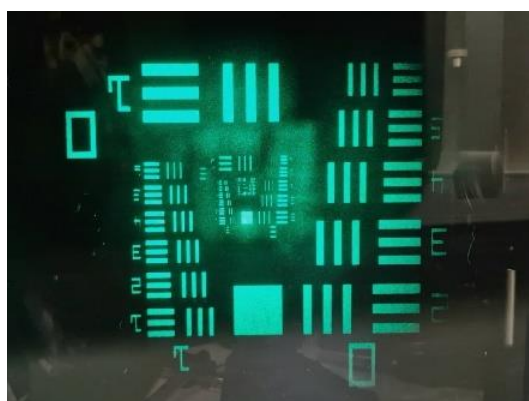


Рис. 3. Виртуальное изображение наблюдаемое из плоскости выходного зрачка

## 2. Результат

Рассмотренная система обладает полем зрения  $60^\circ$  и выходным зрачком 10 мм, при значении eye relief 21,7 мм. Данная схема была воспроизведена в виде прототипа. В качестве источника изображения, расположенного в плоскости промежуточного изображения голограммы, использовалась голограмма с записанным пространственным изображением мира.

## Заключение

Свойства голографических оптических элементов могут быть использованы для достижения различных целей и решения оптических задач. В данном случае, свойства осевой голограммы помогли достичь компромисса между полем зрения и размером выходного зрачка. Однако осевые голограммы обладают и недостатками, которые следует учесть при их использовании в системах. К таким недостаткам относятся шумы переотражений, возникающие при прохождении излучения через подложку голограммы и саму голограмму – выражаются в виде бликов, как на Рис.3. Тем не менее, данная проблема может быть легко решена изменением геометрии схемы записи голограммы.

## Благодарность

Данная работа была выполнена при поддержке программы УМНИК - VR/AR 2020, Грант №677ГУЦЭС8-D3/63857, а также при использовании студенческой лицензии OpticsStudio, предоставленной компанией Zemax.

## Список источников

- [1] **Bongsu Shin** Compact augmented-reality glasses using holographic optical element combiner / B. Shin, S. Kim, V. Druzhin, P. Malinina, S. Dubynin, A. Bolotova, S. Kopenkin, A. Putilin, W. Seo, C.-K. Lee, G. Sung, Y.-T. Kim, J. Seo, J.-S. Chung, H.-S. Lee, // SPIE Proceedings – 2019. – V.10944. – P10944G.
- [2] **A. R. Travis**, Wedge guides and pupil steering for mixed reality / A. R. Travis, L. Chen, A. Georgiou, J. Chu, J. Kollin, // Jnl Soc Info Display. – 2018. – Vol 1. – P. 526–533.

## Axial hologram in augmented reality systems

*A. A. Kalinina<sup>1</sup>, A. Putilin<sup>2</sup>, S. Kopenkin<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> MIPT, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Russian technological university (MIREA), Moscow, Russia

Conventionally, hologram-based augmented reality systems operate with off-axial holograms for image transferring. It provides wide field-of-view, high efficiency and system compactness. The main drawback of such systems is tiny eyebox ~ 1mm that limits using of the system in real devices. We offer using of axial hologram in augmented reality system for achievement of combination of wide field-of-view with large eyebox size. In this paper we demonstrate features of virtual image formation in systems with axial hologram, show the system architecture and prove our

investigations with experimental results. The system has field-of-view more than 50° and eyebox diameter more than 10mm.

*Keywords:* Holographic optical elements, Augmented reality glasses, HMD, Head-mounted display.

# Качество восстановленного 3D голографического контента после передачи динамической голографической информации методом сжатия, аналогичным SSB

С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Количественно обсуждается большая информационная ёмкость голограмм, которую отмечали ещё её первые исследователи Ю. Н. Денисюк и Э. Лейт с Ю. Упатниексом, Р. J. Van Heerden и В. Hill. Передача таких массивов с частотой кадровой развёртки 25 Гц требует пропускной способности канала по Шеннону  $4 \cdot 10^{12}$  байт/с. Это требует полосы пропускания 500 ГГц, что перекрывает весь доступный радиодиапазон. Одно из решений проблемы предложено в патенте РФ №2707582 С1. При передаче предложенным способом появляются специфические абберации и шумы. Показано, что величина таких искажений 3D сигнала мала и предлагаемый метод передачи 3D контента пригоден как основа для разработки 3D голографического TV и 3D дополненной реальности.

*Ключевые слова:* Голография, Передача информации, Дополненная реальность, Голографическое TV.

*Цитирование:* Шойдин, С. А. Качество восстановленного 3D голографического контента после передачи динамической голографической информации методом сжатия, аналогичным SSB / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 172–176.

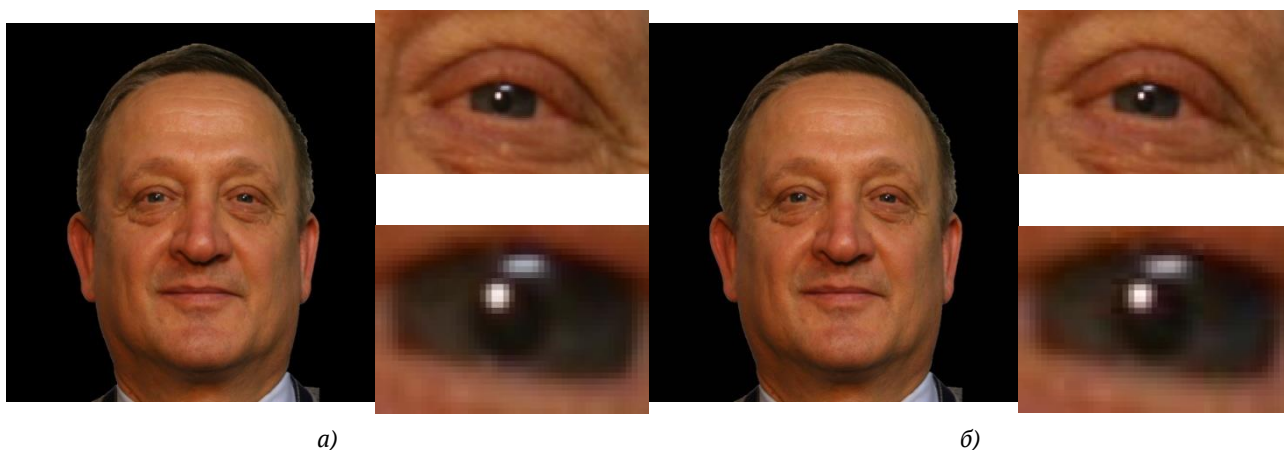
## Введение

Как было показано в работах [1, 2, 3, 4] для передачи 3D голографического видеоконтента по обычным каналам связи необходимо организовать существенное сжатие голографической информации. Как было показано в [5], на основе анализа современного состояния работ, традиционные методы энтропийного кодирования на сегодняшний день далеки от возможности реализации требуемого для такой передачи сжатия голографической информации в  $10^6$  раз. Поэтому был предложен алгоритм передачи 3D голографической информации в виде двух основных модальностей 3D изображения – 2D текстуры поверхности голографируемого объекта (сюжета) и 2D его топографической карты глубин [6], которые позволяют передавать 3D голографическую информацию со значительным её сжатием, аналогично передаче радиосигнала методом SSB.

В [7] были показаны результаты эксперимента по передаче таким образом 3D голографической информации с телевизионной частотой кадровой развёртки, по которой на приёмном конце канала связи была синтезирована компьютерная голограмма, восстанавливающая объёмное изображение объекта голографирования с квазинепрерывным параллаксом и высоким качеством восстановленного изображения, не хуже, чем в стандарте Full HD.

Однако в процессе передачи выяснилось, что для достижения требуемой частоты кадровой развёртки изображений более высокого качества, как в стандартах 4К и 8К, иногда приходится сжимать используемые 2D сигналы, представляющие карту глубин и текстуру. Причём сжатие текстуры более актуально в силу специфики человеческого восприятия объёма, когда мелкие морщинки на лице ни конвергенцией, ни аккомодацией не разрешимы, а воспринимаются только как теньевые полосы на текстуре.

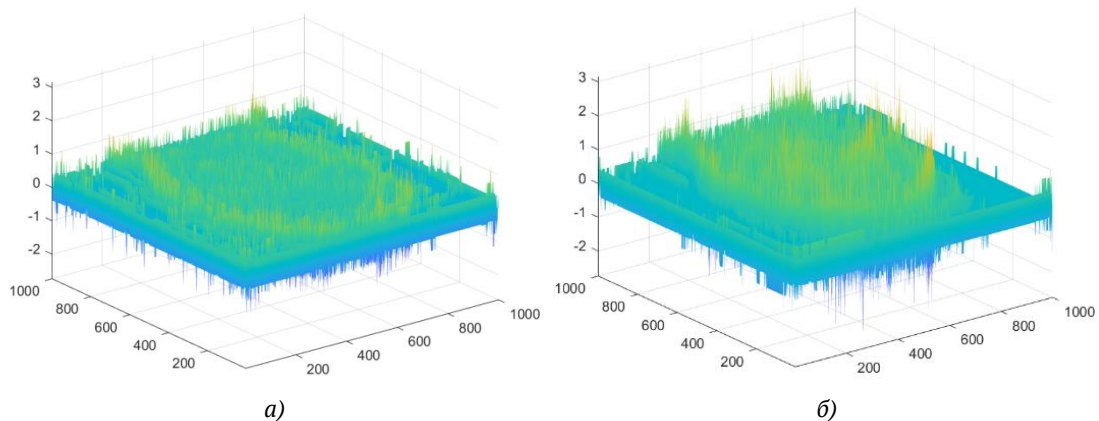
Реально используемая степень сжатия, использованная в [7], была по шкале качества JPEG выбрана в районе 70%. Зрительно такое сжатие не воспринимается сниженным по качеству, поскольку текстура восстановленного изображения практически неотличима (см. рис. 1).



**Рис. 1.** а) изображение сжатой JPEG без потерь текстуры 3D объекта с увеличенными размерами фрагмента глаза и б) аналогичные изображения текстуры и её фрагментов, сжатое по шкале качества JPEG до 70%

На рис. 2а приведена разница интенсивностей рис. 1а и рис. 1б, что соответствует разнице глубин цвета до сжатия JPEG и после сжатия до 70%. Видно слабое, не превышающее 3% искажение глубины цвета передаваемого изображения текстуры.

Также и в фазовой компоненте, сформированной объектом волны, т. е. в восстановленной на приёмном конце канала связи карте глубин, были обнаружены отдельные пиксели, выпавшие из общей гладкой структуры. Ввиду малости их абсолютных значений на рисунке 2б представлена только их разница, представляющая собой разницу положений карты пространственных глубин перед сжатием и отправкой по каналу связи и после её приёма и восстановления.



**Рис. 2.** а) разница глубин цвета не превышает 3% от максимального значения до сжатия в JPEG перед отправкой по каналу связи и после его сжатия на 70% и последующих передачи, приёма и восстановления на другом конце канала связи; б) разница карт пространственных глубин 3D объекта, не превышает 5% от максимального значения до сжатия в JPEG перед отправкой по каналу связи и после его сжатия на 70% и последующих передачи — приёма и восстановления на другом конце канала связи

Видно, что отдельные пиксели текстуры как бы выпадают из общей структуры 3D поверхности, образуя почти случайную картину выбросов, но которые не выходят за границу ошибки в 3%, а отдельные пиксели карты пространственной глубины голографируемого 3D объекта ведут себя аналогично, но их разница не превышает 5%. Поскольку процесс цифровой передачи сигнала осуществлялся в стандарте IEEE 802.11n (версия стандарта 802.11 для сетей Wi-Fi, появившаяся в 2009 году получившая название Wi-Fi 4), следует учесть, что указанный стандарт сам содержит специальным образом введённую избыточность, основанную на блочном кодировании, исправляющую случайные ошибки при передаче цифрового потока данных. Следовательно, единственным источником указанных искажений при передаче 3D голографической информации может служить только сжатие JPEG, осуществлённое до 70% по собственной шкале качества JPEG.

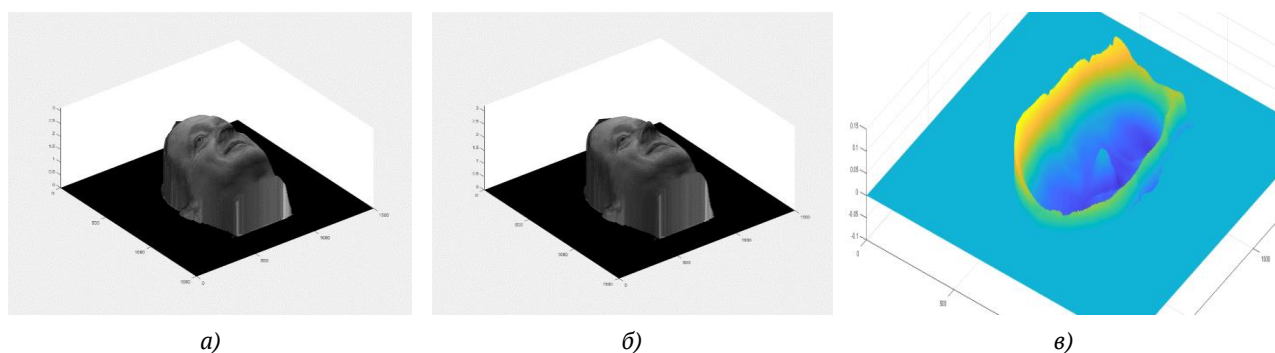
Другие искажения, замеченные в работе по передаче 3D голографической информации по радиоканалу Wi-Fi, тоже относятся к способу создания карты глубин.

Так, при передаче 3D голографической информации, на приёмном конце канала связи для синтеза голограммы 3D объекта может использоваться как его карта глубин по форме искривлённых структурированных полос, наблюдаемых в изопроекции, так и с помощью дифракционной структуры, образуемой этими полосами.

В первом случае синтез компьютерной голограммы происходит в традиционном режиме по опорному и объектному (сформированному 3D объектом голографирования) пучку [5]. Во втором – путём прямой передачи картины паттернов, искривлённых при их проекции на 3D объект голографирования и последующим моделировании его освещения монохроматическим излучением. Дифракция на такой структуре из паттернов искривлённых полос образует несколько порядков дифракции, один из которых формирует 3D изображение карты поверхности 3D объекта голографирования. Компьютерная модуляция каждой из точек

этой поверхности пропорционально интенсивности, соответствующей ей точки текстуры создаёт виртуальное полноцветное 3D изображение объекта, практически тождественное созданному при виртуальном восстановлении его традиционной компьютерной голограммы.

Однако при численном моделировании указанного процесса была замечена некоторая разница между изображением, восстановленным классическим образом синтезированной компьютерной голограммой и изображением, полученным в результате дифракции на изображении искривлённых паттернов. На рисунке 3 показаны оба, восстановленных описанным образом 3D изображения и поле разницы их глубин.



**Рис. 3.** Восстановленные 3D изображения объекта: а) – компьютерной голограммой, 3D объекта голографирования, синтезированной традиционным способом; б) – при дифракции восстанавливающей волны на структуре, образованной паттернами искривлённых 3D объектом вертикальных полос; в) – разница карт глубин, восстановленных указанными технологиями 3D объектов

Видно, что максимальные участки полной глубины от разницы двух 3D изображений равна 0,25 от глубины в одну длину волны  $\lambda$ , которой соответствует набег фазы  $2\pi$ . Разница восстановленных глубин по сравнению с  $2\pi$  оказалась менее 4%, что является хорошим совпадением, однако в причинах её возникновения ещё следует разбираться. Внешне этот эффект похож на возникновение продольных аберраций, хотя механизм их появления ещё обсуждается.

### Список источников

- [1] **Титарь, В. П.** Проблемы создания голографической телевизионной системы / В. П. Титарь, Т. В. Богданова // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2(7). – С. 38-42.
- [2] **Денисюк, Ю. Н.** Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта? / Ю. Н. Денисюк // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61. – № 8. – С. 149-161.
- [3] **Комар, В. Г.** Информационная оценка качества изображения кинематографических систем / В. Г. Комар // Техника кино и телевидения. – 1971. – № 10. – С. 9-22.
- [4] **Lucente, M.** Computational holographic bandwidth compression / M. Lucente // IBM Systems Journal. – 1996. – Т. 35. – № 3.4. – С. 349-365. <https://doi.org/10.1147/sj.353.0349>.
- [5] **Kang, H.** Computer-generated 3D holograms of depth-annotated images / H. Kang, C. Ahn, S. Lee, S. Lee // Proceedings of SPIE. – 2005. – Т. 5742. – С. 234-241. <https://doi.org/10.1117/12.587422>.



- [6] **Патент RU2707582C1.** Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин. – Российская Федерация, МПК G03H 1/00; заявл. 03.07.2018; опубл. 28.1.2019.
- [7] **Пазоев, А. Л.** Передача 3D голографической информации по радиоканалу / А. Л. Пазоев, С. А. Шойдин // Сб. трудов XXXII междунар. Школы-симп. по голографии, когерентной оптике и фотонике (HOLOSCHOOL XXXII). – 2022. – С. 132-134.

## **The quality of the restored 3D holographic content after the transmission of dynamic holographic information by a compression method similar to SSB**

*S. A. Shoydin, A. L. Pazoev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

The large information capacity of holograms is discussed quantitatively, which was noted by its first researchers Yu. N. Denisyuk and E. N. Leith, J. Upatnieks, P. J. Van Heerden and B. Hill. The transmission of such arrays with a frame rate of 25 Hz requires a Shannon channel bandwidth of  $4 \cdot 10^{12}$  bytes/s. This requires a bandwidth of 500 GHz, which covers the entire available radio band. One of the solutions to the problem is proposed in Patent RF No. 2707582 C1. When transmitting by the proposed method, specific aberrations and noises appear. It is shown that the magnitude of such distortions of the 3D signal is small and the proposed method of transmitting 3D content is suitable as a basis for the development of 3D holographic TV and 3D augmented reality.

*Keywords:* Holography, Information transmission, 3D augmented reality, Holographic TV.

# Искажения неосевых голографических линзовых элементов в схемах дисплеев дополненной реальности

Н. А. Путилин<sup>1</sup>, С. С. Копенкин<sup>2,3</sup>, С. Е. Дубынин<sup>2,4</sup>, А. Н. Путилин<sup>2</sup>, Ю. П. Бородин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

При разработке дисплеев дополненной и смешанной реальности голографические устройства совмещения световых потоков линзового типа являются наиболее эффективными, однако искажения таких элементов становятся очень значительными при расширении апертуры и/или выходного зрачка. Доклад посвящен анализу трудноустраняемых искажений широкоапертурных внеосевых голографических линз, возникающих на границах раздела оптических сред при записи голограмм. Приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментальной записи голографических линзовых бим-комбайнеров.

*Ключевые слова:* Голографические оптические элементы, Голографические искажения, Дисплеи дополненной реальности.

*Цитирование:* Путилин, Н. А. Искажения неосевых голографических линзовых элементов в схемах дисплеев дополненной реальности / Н. А. Путилин, С. С. Копенкин, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, Ю. П. Бородин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 177–180.

## Введение

Одной из быстроразвивающихся областей лазерной оптики и голографии, в последнее время, стали системы дополненной и смешанной реальности [1,2]. А поскольку одним из ключевых элементов таких систем являются оптические элементы совмещения реального и виртуального изображения — бим-комбайнеры (beam combiners, BC) то, интенсифицировались и исследования в области голографических оптических элементов, традиционно использовавшимся для построения такого типа устройств.

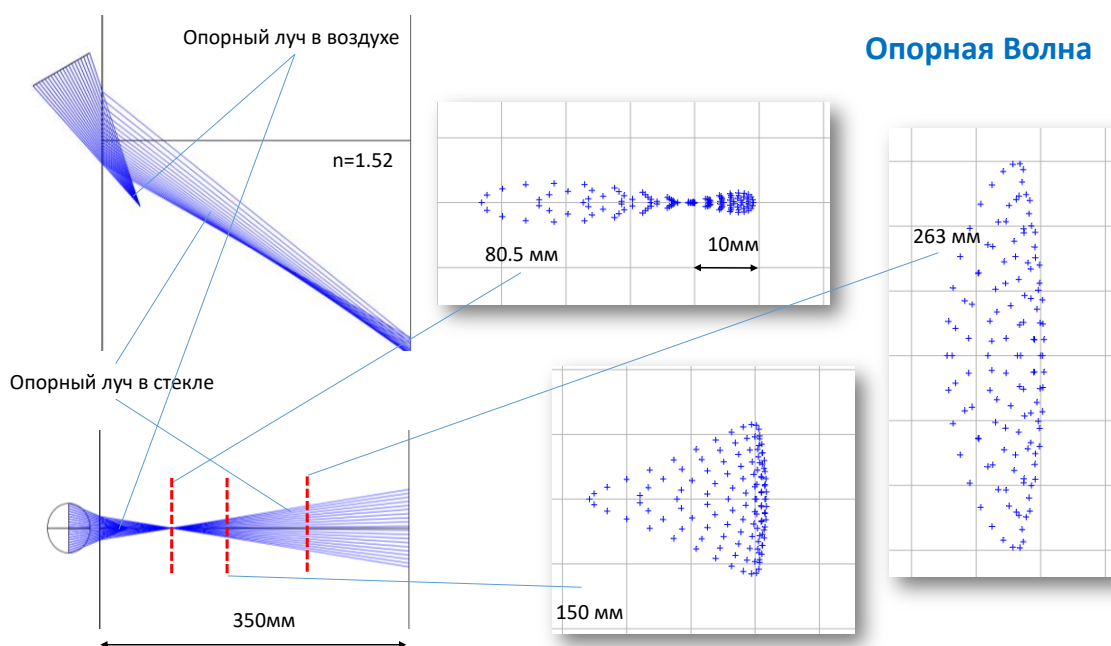
## Искажения волновых фронтов при записи неосевых голографических линз

Традиционно в голографии изучались те случаи искажения волновых фронтов, которые возникают при изменении параметров восстанавливающей волны из состояния наилучшего восстановления, отталкиваясь от параметров записываемых пучков. Этому методу прибегают всегда, когда необходимо изучить голографические аберрации [3,4].

Иногда параметры воспроизводящей голограмму волны очень сильно отличаются от записывающих волн и в таком случае искажения восстановленных волновых фронтов очень значительны, именно такие режимы работы голографических бим-комбайнеров характерны

для работы широкоапертурных отражательных голографических дисплеев дополненной реальности [5].

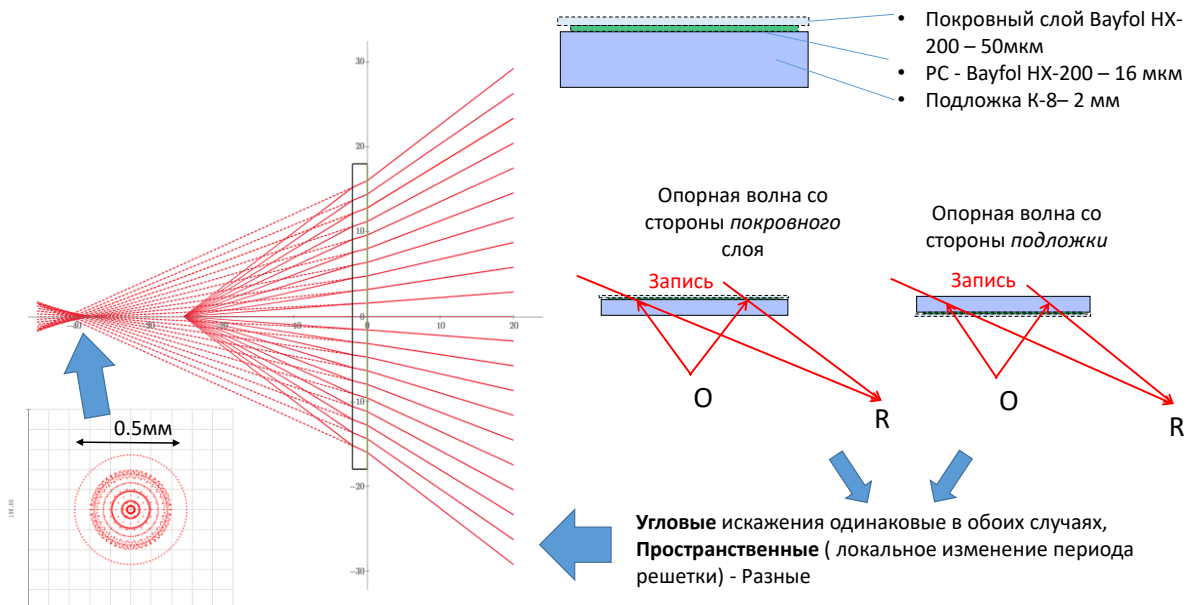
Рассмотрим некоторые искажения такого типа голограмм, возникающие в любой схеме записи голограмм и которые ранее редко учитывались, а именно искажения волновых фронтов, возникающие на границе раздела сред. На рис. 1 показаны результаты моделирования волновых фронтов, доходящие до регистрирующей среды при записи широкоапертурных голографических линз, в данном случае считаем регистрирующую среду тонкой и брегговские эффекты не рассматриваем. Средний угол опорной волны  $60^\circ$ , фокусировка в воздухе 50 мм, от плоскости регистрирующей среды.



**Рис.1.** Моделирование перехода опорной волны через границу раздела сред

Характерно, что при таких углах падения света на границы подложки и покровного защитного слоя со стороны воздуха возникают значительные искажения и волны, регистрируемые на голограмме, фиксируют эти искажения. Опорная волна приобретает искажения при прохождении света через покровный слой (порядка 50 мкм из лавсана или поликарбоната), а предметный луч – рис.2 (угловой апертурой более  $60^\circ$  сильно искажается на границе подложки, на которую нанесена регистрирующая среда.

## Предметная волна



**Рис.2.** Моделирование перехода предметной волны через границу раздела сред

Особенно это заметно на сходящемся опорном пучке, поскольку при воспроизведении комплексно-сопряженным опорным пучком искажения пучков не компенсируются при обратном распространении света через границу подложки, а приобретают дополнительные искажения. Экспериментальная запись таких голограмм на регистрирующей среде Bayfol HX-200 подтвердила адекватность компьютерной модели. Исследовались схемы восстановления голограмм, как волнами максимально подобными волнам записи (фокусировка точка в точку), так и волнами, соответствующими восстановлению виртуального изображения (точка в бесконечность). Записанные голограммы имели эквивалентное фокусное расстояние для формирования виртуального изображения порядка 12.5 мм, угловая апертура голограмм достигала  $100^\circ$ , а линейная апертура до 50 x 40 мм. Если не применять дополнительных средств слежения за зрителем и предискажения волновых фронтов, то искажения голографических линз ограничивали зрачок оптической системы такого виртуального дисплея до 2.5 мм.

## Заключение

Приведен анализ искажений широкоапертурных голографических линз для дисплеев дополненной реальности, связанных с особенностями схем записи и рефракцией в слоях регистрирующих сред. Показаны возможные пути минимизации части искажений и схемы компенсации искажений путем предискажений записывающих пучков.

## Список источников

- [1] Kress B. C. Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets. – Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2020.
- [2] Сакмаки О., Ролланд J. Head-worn displays: a review // Journal of display technology. – 2006. – Т. 2. – №. 3. – С. 199-216.

- [3] Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию // М.: Советское радио–1979.–304 с. – 1979.
- [4] Грейсук Г. И. и др. Моделирование и расчёт голограммного комбинера виртуального дисплея // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40. – №. 2. – С. 188-193.
- [5] Yeom H. J. et al. 3D holographic head mounted display using holographic optical elements with astigmatism aberration compensation // Optics express. – 2015. – Т. 23. – №. 25. – С. 32025-32034.

## **Distortions of Off-Axis Holographic Lens Elements in Augmented Reality Display Circuits**

*N. A. Putilin<sup>1,2</sup>, S. S. Kopenkin<sup>2,3</sup>, S. E. Dubynin<sup>2,4</sup>, A. N. Putilin<sup>2</sup>, Y. P. Borodin<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

The lens-type holographic elements application in augmented and mixed reality displays are the most effective, however, the distortion of such an elements becomes very significant when the attempts was made for expanding aperture and/or exit pupil. The report is devoted to the analysis of hard-to-remove distortions of wide-aperture off-axis holographic lenses that occur at the boundaries of optical media during hologram recording. The results of computer simulation and experimental recording of holographic lens beam combiners are presented.

*Keywords:* Holographic optical elements, Holographic distortions, Augmented reality displays.

# Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений

В. Б. Глухенькая<sup>1</sup>, Н. М. Толкач<sup>1,2</sup>, П. И. Лазаренко<sup>1</sup>, А. А. Шерченков<sup>1</sup>, С. А. Козюхин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИУ «Московский институт электронной техники», Москва, Россия

<sup>2</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

<sup>3</sup> Институт общей и неорганической химии им. Курнакова РАН, Москва, Россия

Работа посвящена исследованию процесса кристаллизации пленок GST в поле непрерывного лазерного излучения и влияния фазового состояния GST на оптические свойства многослойной структуры GST/ITO/Al/подложка (GIA). Анализ результатов показал, что энергетический диапазон кристаллизации аморфного GST (в составе структуры GIA красного цвета) в fcc-структуру лежит в интервале от 0,11 до 0,22 мДж/мкм<sup>2</sup>. Процесс кристаллизации сопровождается монотонным изменением отражательной способности и формы спектров КРС. Пороговое значение энергии воздействия составляет 1,1 мДж/мкм<sup>2</sup>. Облучение поверхности большими энергиями приводит к деградации материала и его частичному или полному испарению. Результаты данной работы демонстрируют возможность записи однородных многоуровневых оптически контрастных изображений на поверхности структур GIA RGB-цветов.

*Ключевые слова:* Отражающие дисплеи, GST, Лазерная кристаллизация, Оптический контраст, Перестраиваемость, Энергонезависимость, Активная фотоника.

*Цитирование:* Глухенькая, В. Б. Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений / В. Б. Глухенькая, Н. М. Толкач, П. И. Лазаренко, А. А. Шерченков, С. А. Козюхин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 181–185.

## Введение

Материал  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) интенсивно применяется в области активной фотоники для создания элементов оптических отражающих дисплеев и компьютерно-перестраиваемых голограмм. Широкое распространение тонких плёнок GST в нанофотонике объясняется большим оптическим контрастом (~30%) между аморфным и кристаллическим состояниями, фазовые превращения между которыми могут быть инициированы низкоэнергетическим тепловым, лазерным или электрическим воздействием. Данные фазовые превращения обратимы и протекают за время ~ 500 пс [1]. Кроме того, устройства, разрабатываемые на основе GST энергонезависимы, т.к. материал обладает способностью сохранять фазовое состояние после прекращения энергетического воздействия.

Перечисленные преимущества и применение тонких плёнок GST в составе многослойной структуры GST/ITO/Al/подложка (GIA) делают данный материал привлекательным для разработки элементов отображения информации в видимой и

ИК-областях спектра [2,3]. Цвет структур GIA определяется толщиной слоя ИТО, а оттенок и ее отражательная способность регулируются фазовым состоянием GST.

Данная работа посвящена исследованию процесса кристаллизации GST в поле непрерывного лазерного излучения, влиянию фазового состояния GST на оптические свойства структуры GIA и определению оптимальных энергетических режимов для формирования перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

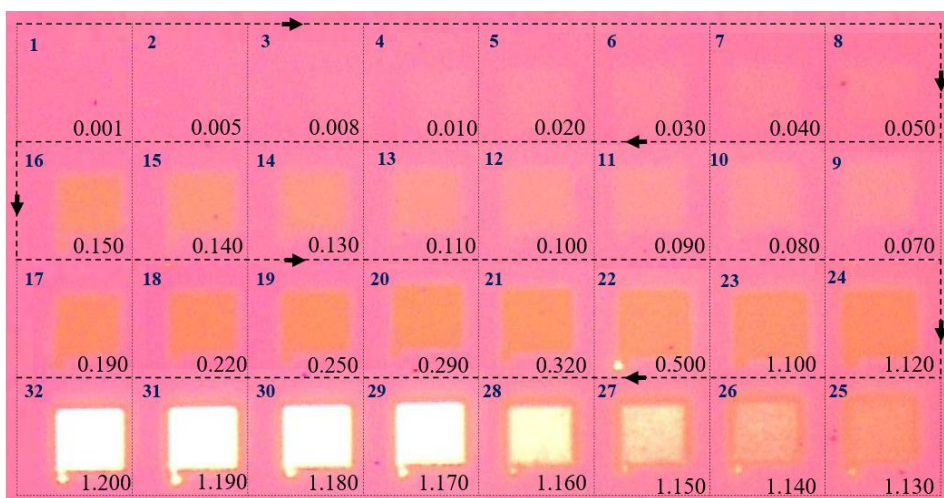
## 1. Формирование образцов и методика проведения эксперимента

Слои структур GIA были сформированы методом DC-магнетронного распыления на окисленные кремниевые подложки. Контроль толщины осаждаемых слоев проводился методом стилусной профилометрии по образцам-спутникам. Толщины слоев выбирались по результатам математического моделирования так, чтобы цвет структуры GIA соответствовал классическим RGB-цветам: GST (10 нм), Al (100 нм) и ИТО (160, 70 и 200 нм для R-, G- и B-цветов соответственно). Моделирование выполнялось в среде Mathcad по формулам Френеля для многослойных систем с учетом измеренных спектров показателя преломления  $n(\lambda)$  и коэффициента экстинкции  $k(\lambda)$  для каждого слоя моделируемой многослойной структуры.

Лазерная кристаллизация тонких пленок GST проводилась в поле непрерывного лазерного излучения в режиме сканирования ( $\lambda = 403$  и  $532$  нм,  $P_{\max} = 5$  мВт, 1 Гц) с плотностью энергии в диапазоне от 0,001 до 1,200 мДж/мкм<sup>2</sup>. Структурные изменения модифицированных в процессе лазерного сканирования областей исследовались методом комбинационной спектроскопии (КРС), а расчет оптического контраста проводился по изменению отражательной способности поверхности после облучения.

## 2. Обсуждение полученных результатов

На рис. 1 представлена матрица из 32 протяженных областей, полученных вследствие сканирования поверхности структуры GIA непрерывным лазерным излучением. Размер сформированных областей соответствует площади сканирования и составляет 5x5 мкм<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** Матрица на поверхности структуры GIA (номер точки и плотность энергии (мДж/мкм<sup>2</sup>) отмечены в левом верхнем и правом нижнем углах соответственно).

Из рис. 1 видно, что увеличение энергии облучения сопровождается монотонным изменением отражательной способности поверхности. Оптические изменения поверхности пленок GST после лазерного воздействия можно разделить на 4 группы (рис. 2а).

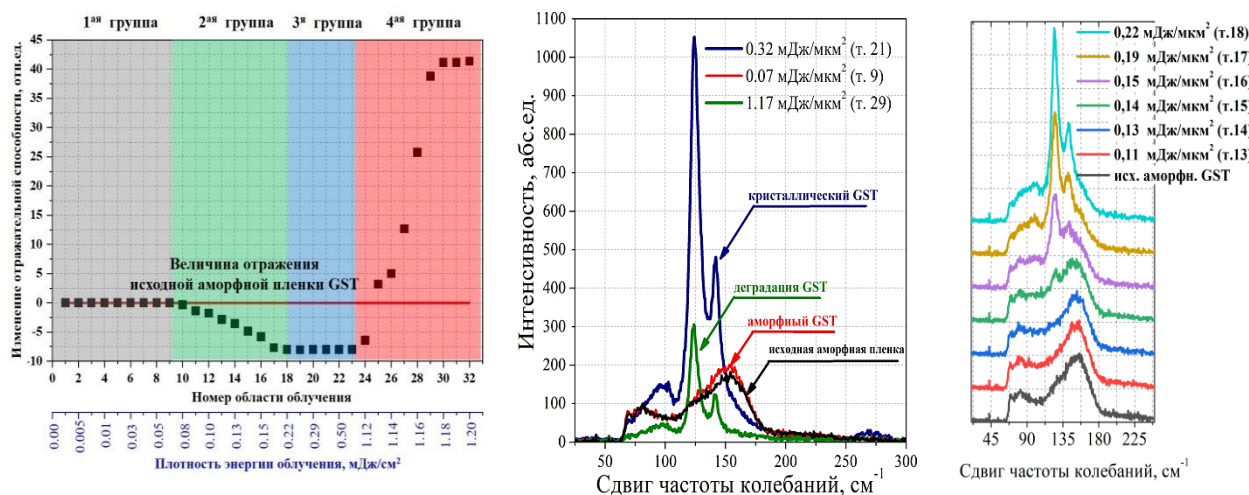
1-ая группа – области, отражательная способность которых не изменилась или изменилась незначительно (до 0,070 мДж/мкм<sup>2</sup>). Результаты КРС для этих участков показали, что материал GST находится в исходном аморфном состоянии (рис. 2б).

2-ая группа – области с монотонным уменьшением отражательной способности (от 0,07 до 0,22 мДж/мкм<sup>2</sup>). Анализ изменений оптического контраста и формы спектров КР показал, что монотонные изменения соответствуют фазовому переходу GST из аморфного состояния в кристаллическое (рис. 2в), сопровождающемуся изменением оптического контраста на 8 у.е.

3-я группа – области, коэффициент отражения в которых выше, чем у исходной аморфной пленки (от 0,22 до 1,08 мДж/мкм<sup>2</sup>). КР спектры, полученные от этих областей, соответствуют спектрам GST в кристаллическом состоянии с ГЦК-решеткой (рис. 2б).

4-ая группа – области (более 1,08 мДж/мкм<sup>2</sup>), в которых наблюдается увеличение отражательной способности. Это объясняется деградацией облучаемого материала и его частичным испарением и сопровождается уменьшением площади КР спектров (рис. 2б).

Аналогичные результаты были получены на поверхности структур GIA зеленого и синего цветов. Анализ результатов показал, что минимальная пороговая величина лазерного воздействия, приводящая к кристаллизации материала, составляет 0,17 и 0,10 мДж/мкм<sup>2</sup>, а деградации - 1,1 и 0,17 мДж/мкм<sup>2</sup> для синего и зеленого образцов соответственно.



а) Изменение отражательной способности тонкой пленки GST

б) Спектры КРС пленки GST до и после облучения

в) Изменение формы спектров КРС в процессе фазового перехода

**Рис. 2.** Комплексный анализ поверхности структуры GIA после лазерной модификации

Описанный комплексный подход позволяет применять многослойные структуры GIA для формирования перестраиваемых оптических изображений в многоуровневых оптических устройствах. На рис. 3 продемонстрирована запись оптически контрастных изображений



(40x40 мкм<sup>2</sup>) на поверхности структур GIA красного (532 нм и 0,22 мДж/мкм<sup>2</sup>), зеленого (403 нм 0,10 мДж/мкм<sup>2</sup>) и синего (532 нм и 0,17 мДж/мкм<sup>2</sup>) цветов.



**Рис. 3.** Протяженные оптически контрастные RGB-изображения на поверхности структуры GIA`

### Заключение

Анализ результатов показал, что энергетический диапазон кристаллизации аморфного GST (в составе структуры GIA красного цвета) в fcc лежит в интервале от 0,11 до 0,22 мДж/мкм<sup>2</sup>. Процесс кристаллизации сопровождается монотонным изменением отражательной способности и формы спектров КРС. Пороговое значение энергии воздействия составляет 1,1 мДж/мкм<sup>2</sup>. Облучение поверхности большими энергиями приводит к деградации материала и его частичному или полному испарению.

Установлены режимы записи оптически контрастного однородного изображения большой площади на поверхности структуры GIA: 0,22 мДж/мкм<sup>2</sup>, 0,10 мДж/мкм<sup>2</sup> и 0,17 мДж/мкм<sup>2</sup> для структуры GIA красного, зеленого и синего цветов соответственно. Скорость сканирования - 1 Гц..

Результаты данной работы демонстрируют возможность формирования слоев с различной долей кристаллической фазы и могут быть использованы для разработки технологии создания многоуровневых энергонезависимых перестраиваемых элементов для устройств активной нанофотоники и систем отображения информации.

### Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №20-79-10322).

### Список источников

- [1] **Lotnyk A.** Temperature dependent evolution of local structure in chalcogenide-based superlattices / A. Lotnyk, I. Hilmi, M. Behrens, B. Rauschenbach // Applied Surface Science. — 2021. — Vol. 536. — P. 147959. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147959.
- [2] **Galarreta C.** Reconfigurable multilevel control of hybrid all-dielectric phase-change metasurfaces / C. Galarreta, I. Sinev, A. Alexeev, P. Trofimov, K. Ladutenko, S. Carrillo, E. Gemo, A. Baldycheva, J. Bertolotti, C. Wright // Optica. — 2020. — Vol. 7. — P. 476-484. — DOI: 10.1364/OPTICA.384138.
- [3] **Zhou H.** Switchable active phase modulation and holography encryption based on hybrid metasurfaces / H. Zhou, Y. Wang, X. Li, Q. Wang, Q. Wei, G. Geng, L. Huang // Nanophotonics. — 2020. — Vol. 9. — P. 905-912. — DOI: 10.1515/nanoph-2019-0519.

# Formation of tunable non-volatile optically contrast image on the surface of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> thin films for multicolor reflective displays and holograms application

*V. Glukhenkaya<sup>1</sup>, N. Tolkach<sup>1,2</sup>, P. Lazarenko<sup>1</sup>, A. Sherchenkov<sup>1</sup>, S. Kozukhin<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

<sup>3</sup> Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

Crystallization process initiated in GST thin film under CW laser irradiation and influence of phase state of GST films on optical properties of multilayered GST/ITO/Al (GIA) structure were investigated. It was shown, that continuous laser exposure leads to significant changes of the optical contrast and Raman spectra of extended areas modifying by CW laser irradiation. Range of changes corresponds to the phase transition of amorphous GST thin film into crystalline state. The energy range of crystallization is in the interval from 0.11 to 0.22 mJ/μm<sup>2</sup>. The difference in reflectivity change between two phase states is 8 r.u. The threshold energy value of GST material degradation is more than 1.10 mJ/μm<sup>2</sup>. The results of this work demonstrate the possibility of recording optically uniform multilevel optically contrast large-size image on the surface of GIA RGB-color structures.

*Keywords:* Reflective display, GST, Laser crystallization, Optical contrast, Tunability, Non-volatility, Active photonics.

# Применение голографических бим-комбайнеров в различных типах дисплеев дополненной реальности

А. Н. Путилин<sup>1</sup>, А. В. Морозов<sup>1,2</sup>, В. В. Дружин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Одним из основных элементов дисплеев дополненной реальности (AR) является элемент совмещения световых потоков — бим-комбайнер (BC). Применение голографических оптических элементов для этих целей позволило разработать компактные, планарные схемы AR дисплеев. В докладе описываются несколько типов BC, а именно, изображающие широкоапертурные BC линзового типа, волноводные голографические перископические системы и отражательные осевые голографические зеркала. Рассмотрены их основные характеристики и ограничения применения.

*Ключевые слова:* Голографические оптические элементы, дисплеи дополненной реальности, волноводные голограммы.

*Цитирование:* Путилин, А. Н. Применение голографических бим-комбайнеров в различных типах дисплеев дополненной реальности / А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 186–189.

## Введение

Оптические элементы совмещения реального и виртуального изображения – бим-комбайнеры (beam combiners, BC) являются определяющим функциональным узлом систем дополненной и смешанной реальности [1]. Голограммы оказываются одним из самых эффективных BC поскольку практически не искажают недифрагировавшие световые пучки и, одновременно, разделяют по углам локально формируемый источник виртуального изображения и реальное окружающее зрителя пространство.

### Виды голографических устройств совмещения световых потоков

Два большие класса голографических BC составляют изображающие (одновременно выполняющие роль последней линзы оптической проекционной системы) и неизображающие устройства совмещения (выполняющие роль параллельного переноса виртуального изображения в область комфортного восприятия зрителя) — рис.1.

Оба эти класс имеют свои преимущества и недостатки, более того, в последнее время все чаще в конкретных условиях преимущества могут меняться с недостатками, например, в схемах с экстремально большим углом обзора, поэтому появились схемы комбинированного использования голографических линзовых и неизображающих волноводных перископов [2,3].

## Голографические элементы совмещения световых потоков (BC - beam combiners) для дисплеев дополненной реальности (AR)

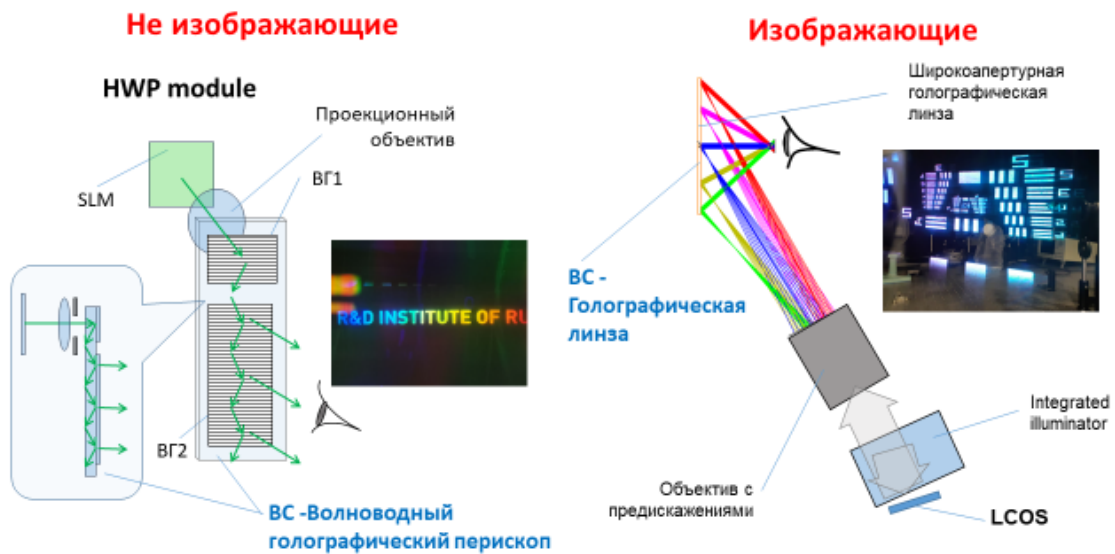


Рис.1. Классы голографических бим-комбайнеров

Рассмотрим основные свойства голографических бим-комбайнеров линзового типа, с точки зрения минимизации габаритов проекционной системы выгодно, когда последний и самый большой изображающий компонент проекционной системы совмещен с бим-комбайнером, обладающим наилучшей прозрачностью и небольшой толщиной. Очевидно, что таким высоким требованиям отвечают лишь голографические линзы. На рис. 1 справа показана схема работы широкоапертурного НМД формирующего виртуальное изображение апертурой более  $60^\circ$  и использующего голографическую линзу с эквивалентным фокусным расстоянием в 12,5 мм и линейными размерами в 50 на 40 мм, схема записи таких линз (точечный расходящийся предметный пучок и наклонный сходящийся опорный). Поскольку схема записи сильно отличается от схемы воспроизведения виртуального изображения, то при воспроизведении наблюдаются очень большие голографические aberrации в изображении. Линза имеет значительный астигматизм, локальные фокусы варьируются от 16 мм до 7 мм, кривизна области формирования вторичного изображения проекционной системы очень велика, поэтому для успешного формирования вторичного действительного изображения перед голографической линзой используется специально спроектированный объектив, формирующий изображение наклоненное к плоскости модулятора на угол до  $60^\circ$  градусов. Голограммы записывались в регистрирующей среде Baufol HX-200, толщиной 16...25 мкм, тремя лазерами (635, 532, 470 нм) одновременно. ДЭ достигала 30%, а брегговский резонанс имел ширину до 7 градусов, что позволяло надеяться на величину зрачка всего НМД дисплея до 3...4 мм. В реальности голографические aberrации были настолько велики, что реальный зрачок не превышал 2,5 мм.

Неизображающие устройства совмещения световых потоков в НМД дисплеях получили широкое распространение именно потому, что они не изменяют кривизну волновых фронтов виртуально изображения, а только мультиплицируя выходной зрачок проектора в несколько раз.



**Рис. 2.** Технологии изготовления голографических бим-комбайнеров

Таким образом, наибольшие нагрузки по формированию качественного виртуального изображения ложатся на традиционную проекционную оптику. Применяются небольшого размера проекторы и волноводные голографические перископы, выходной зрачок проектора (до 10 мм) мультиплицируется в зрачок более 25 на 18 мм, в специализированных HMD для рассматривания виртуального изображения сразу двумя глазами зрачок мог достигать 200 на 15 мм.

Для изготовления голографических бим-комбайнеров используют все возможные варианты записи голограмм — отражательные, пропускающие и осевые, а также регистрирующие среды от брегговских фотополимерных до фоторезистов — рис. 2. Конкретная функциональность дисплея позволяет выбрать необходимую схему записи, общие возможности голографических технологий для построения HMD позволяют уже в настоящее время достичь поля зрения — в  $120^\circ$  и эффективности BC до 50% при RGB формируемом изображении.

### Заключение

Приведен анализ возможных видов голографических устройств совмещения световых потоков, показаны преимущества каждой из схем их формирования и соответствующие недостатки. Показаны возможные пути совмещения технологий для достижения необходимой функциональности дисплеев дополненной реальности.

### Список источников

- [1] Xiong J. et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives // Light: Science & Applications. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-30.
- [2] Putilin A. N. et al. Device for enlarging exit pupil area and display including the same : заяв. пат. 17090999 США. – 2021.

- [3] Shin B. et al. Eye-box expansion using waveguide and holographic optical element for augmented reality head-mounted display // Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR). – SPIE, 2020. – T. 11310. – C. 142–147.

## **Application of holographic beam combiners in various types of augmented reality displays**

*A. N. Putilin<sup>1</sup>, A. V. Morozov<sup>1,2</sup>, V. V. Druzhin<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

One of the main elements of augmented reality (AR) displays is an element of combining light fluxes — a beam combiner (BC). The use of holographic optical elements for these purposes has made it possible to develop compact, planar AR display circuits. The report describes several types of BCs, namely, wide-aperture lens-type BCs, waveguide holographic periscope systems, and reflective axial holographic mirrors. Their main characteristics and application limitations are considered.

*Keywords:* Holographic optical elements, Augmented reality displays, Waveguide holograms.

# Метод компенсации искажений виртуального изображения, формируемого дисплеем дополненной реальности на базе цилиндрического дифракционного волновода

А. Е. Ангервакс<sup>1</sup>, Г. Н. Востриков<sup>1</sup>, Н. В. Муравьев<sup>1</sup>, Р. А. Окунь<sup>1</sup>, А. С. Перевозникова<sup>1</sup>,  
А. Н. Путилин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Исследовательский Центр Самсунг», Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Разработан метод, позволяющий в параксиальном приближении компенсировать искажения, вносимые в виртуальное изображение цилиндрическим волноводом при вводе, распространении и выводе излучения в волноводном режиме. Метод основан на предсказании, вносимом в виртуальное изображение при вводе излучения в волновод, за счет вводного дифракционного оптического элемента и компенсации кривизны волновода на выводе за счет дифракционного оптического элемента с переменным периодом. Выведены аналитические законы изменения периода выводного дифракционного элемента для произвольной кривизны цилиндрического волновода и предсказания плоского волнового фронта на вводе излучения в изогнутый волновод.

*Ключевые слова:* Очки дополненной реальности, Изогнутый волновод, Дифракционные оптические элементы, Голографические оптические элементы

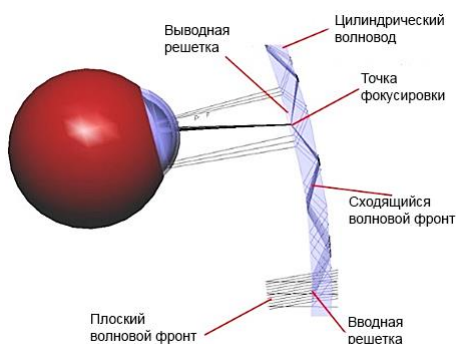
*Цитирование:* Ангервакс, А. Е. Метод компенсации искажений виртуального изображения, формируемого дисплеем дополненной реальности на базе цилиндрического дифракционного волновода / А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 190–193.

Дисплеи дополненной реальности (как правило, для изготовления на их основе персональных очков дополненной реальности) разрабатываются в настоящее время как рядом известных компаний (Google, Apple, Microsoft, Meta, Zeiss), так и многочисленными стартапами (Waveoptics, Dispelix, Lumus, LetinAR, TruLife и т.д.). К настоящему моменту предложено достаточно большое количество концепций таких дисплеев с использованием разных физических принципов и технологий изготовления оптических комбайнеров (элементов совмещения реального и виртуального изображений). Это и оптика сложной формы, и микрзеркала, и дифракционная оптика, и голографические решетки [1–3].

Несмотря на обилие разработок, ни один из прототипов до настоящего времени не запущен в серийное производство; отдельные модели доступны узкому кругу инженеров по тестированию или изготавливаются по заказу военных ведомств. В то же время, продолжается дискуссия о задачах, решаемых подобными устройствами, о технических характеристиках и эстетических критериях, которым они должны удовлетворять, чтобы быть привлекательными для широкого круга потребителей [3, 4]. В частности, предлагается создавать очки дополненной реальности с криволинейными (изогнутыми) волноводами вместо традиционно используемых плоских. Предполагается, что данный подход, во-первых, позволит придать очкам более привычный форм-фактор с изогнутыми стеклами и оправой,

а во-вторых, в перспективе, реализовать функцию коррекции зрения для пользователей с неидеальным зрением (за счет интегрирования линзы в комбайнер) [5–8].

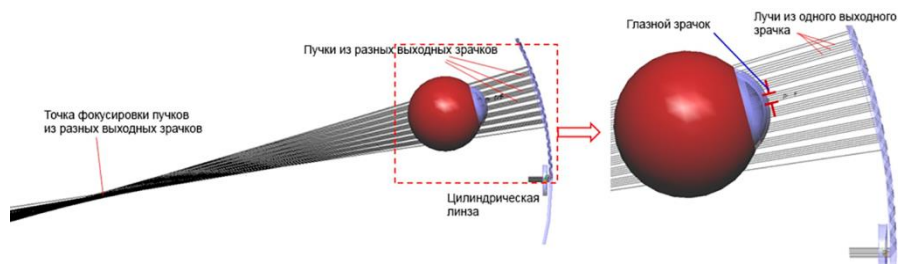
Однако на пути его реализации возникает ряд проблем, в частности, связанных с искажениями, вносимыми в виртуальное изображение при его вводе и выводе из изогнутой волноводной системы (волновода). Данная ситуация проиллюстрирована на рисунке 1, где показана модель волноводной системы с цилиндрическим волноводом без компенсации искажений. Параллельный пучок излучения из проектора попадает на вводную голограмму, распространяется по волноводу за счет эффекта полного внутреннего отражения и выводится выводной голограммой в сторону глаза пользователя. Как видно из рисунка, если не принять специальных мер и использовать голографические решетки с постоянным периодом, то, в отличие от случая плоского волновода, исходно параллельные лучи фокусируются в волноводе. Соответственно, на выходе системы пучок не будет параллельным, и пользователь увидит искаженное изображение.



**Рис. 1.** Волноводная система передачи виртуального изображения от проектора в глаз пользователя, выполненная на основе цилиндрического волновода, в отсутствие компенсации

Для устранения данной проблемы в настоящей работе предлагается вносить предыскажение в виртуальное изображение при его вводе в волновод. В простейшем случае это можно выполнить с помощью цилиндрической линзы с фокусным расстоянием  $f = -R$ , где  $R$  – радиус кривизны волновода (рисунок 2). Линза устанавливается после проектора перед вводной голограммой, расположенной на поверхности волновода. В этом случае лучи, падающие на изогнутый волновод, после преломления и дифракции входят в него под одним и тем же углом независимо от точки входа. Это обеспечивает параллельность пучка, распространяющегося по волноводу за счет эффекта полного внутреннего отражения. Соответственно, будут параллельны лучи, идущие из каждого выходного зрачка в области расположения выводной голограммы. Таким образом, в пределах одного зрачка пользователь будет наблюдать виртуальное изображение, расположенное на бесконечности.

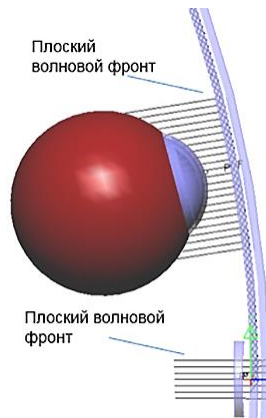




**Рис. 2.** Волноводная система с компенсацией искажений на вводе цилиндрической линзой

Однако при компенсации кривизны волновода только на вводе, пучки, вышедшие из разных зрачков в разных точках изогнутого волновода, будут сходиться в центре его кривизны (рисунок 2), что приведет к двоению (и даже большей повторяемости) виртуального изображения, наблюдаемого пользователем.

Для решения данной проблемы предлагается ввести компенсацию кривизны волновода на выводе за счет использования выводной голографической решетки с переменным периодом в направлении распространения излучения, что обеспечит параллельность всех вышедших из волновода лучей (рисунок 3). При этом пользователь будет наблюдать неискаженное виртуальное изображение, расположенное на бесконечности.



**Рис. 3.** Волноводная система с компенсацией искажений на вводе цилиндрической линзой и на выводе голографической решеткой с переменным периодом

В настоящей работе выведены аналитические законы изменения периода выводной решетки для произвольной кривизны цилиндрического волновода. Продемонстрирована запись таких решеток и их работа совместно с вводным линзовым компенсатором для передачи виртуального изображения из красной области спектра по цилиндрическому волноводу с радиусом кривизны 150 мм.

Следует отметить, что моделирование компенсации искажений выполнено для параксиального случая, то есть для случая нормального падения узкого пучка излучения от проектора на вводную решетку цилиндрического волновода. Соответствующим образом рассчитаны и работают записанные вводные и выводные голографические решетки. Таким образом, наилучшее качество виртуального изображения достигается лишь для центральных

(ненаклоненных или слабонаклоненных) лучей, идущих от проектора в волноводную систему. Для лучей, имеющих большой угол наклона, компенсация будет существенно слабее.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang, Y.** Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays / Y. Zhang, F. Fang // Precision Engineering. — 2019. — Vol. 60. — P. 482–496. — DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.09.009.
- [2] **Zhan, T.** Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges / T. Zhan, K. Yin, J. Xiong, Z. He, S.-T. Wu // iScience. — 2020. — Vol. 23. — 101397. — 13 p. — DOI: 10.1016/j.isci.2020.101397.
- [3] **Kress, B.C.** Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective / B.C. Kress, I. Chatterjee // Nanophotonics. — 2021. — Vol. 10. — № 1. — P. 41–74. — DOI: 10.1515/nanoph-2020-0410.
- [4] **Chang, Ch.** Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective / Ch. Chang, K. Bang, G. Wetzstein, B. Lee, L. Gao // Optica. — 2020. — Vol. 7. — № 11. — P. 1563–1578. — DOI: 10.1364/OPTICA.406004.
- [5] **Groet, G.** Luxexcel: 3D Printing: combining prescription power and a waveguide into a lightweight lens // Proc. SPIE. — 2021. — Vol. 11764. — 117640F. — DOI: 10.1117/12.2597460.
- [6] **Draper, C.T.** Holographic curved waveguide combiner for HUD/AR with 1-D pupil expansion / C.T. Draper, P.-A. Blanche // Optics Express. — 2022. — Vol. 30. — № 2. — P. 2503–2516. — DOI: 10.1364/OE.445091.
- [7] **Volkov, A.** The first high-resolution curved waveguide with replicated eye-boxes, encapsulated in spectacle lenses / A. Volkov, J. Lewis // Proc. SPIE. — 2022. — Vol. 11932. — 119321G. — DOI: 10.1117/12.2632523.
- [8] Tooz essnz Berlin / URL: <https://tooz.com/essnz-berlin>

## Method for compensating distortions of a virtual image formed by an augmented reality display based on a cylindrical diffractive waveguide

*A. E. Angervaks<sup>1</sup>, G. N. Vostrikov<sup>1</sup>, N. V. Muravyev<sup>1</sup>, R. A. Okun<sup>1</sup>, A. S. Perevoznikova<sup>1</sup>,  
A. N. Putilin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

A method has been developed that compensates, in the paraxial approximation, for distortions introduced into a virtual image by a cylindrical waveguide during input, propagation, and output of radiation in the waveguide mode. The method is based on pre-distortion introduced into the virtual image when radiation is input into the waveguide due to the input diffractive optical element and compensation of the waveguide curvature at the output due to the diffractive optical element with a variable period. Analytical laws are derived for the period variation of the output diffractive element for an arbitrary curvature of a cylindrical waveguide and for the pre-distortion of a plane wavefront at the input of radiation into a curved waveguide.

*Keywords:* AR glasses, Curved waveguide, Diffractive optical elements (DOE), Holographic optical elements (HOE).

# Моделирование голографического волновода для коллиматорного прицела

О. Л. Афанасьева, А. Б. Соломашенко, В. А. Кулин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В работе предложена реализация голографического волновода для коллиматорного прицела. Произведено его моделирование в системе автоматизированного проектирования Zemax, осуществлён анализ размеров прицельной точки в плоскости изображения в зависимости от технологических ошибок изготовления поверхности подложки волновода: клиновидности, общей и местной ошибок формы  $N$ ,  $\Delta N$ . В результате сформулированы требования к допускам при изготовлении волновода, а также к его толщине, приведены результаты исследований его основных параметров.

*Ключевые слова:* Голографический волновод, Коллиматорный прицел, Дифракционные решётки

*Цитирование:* Афанасьева, О. Л. Моделирование голографического волновода для коллиматорного прицела / О. Л. Афанасьева, А. Б. Соломашенко, В. А. Кулин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 194–196.

Применение голографических волноводов в устройствах отображения информации и целеуказания позволяет существенно снизить их габаритные параметры за счет того, что излучение, формирующее изображение, распространяется внутри тонкой (от 1 до 2 мм) подложки волновода, а также за счет возможности увеличения размеров области выходного зрачка без необходимости увеличения диаметра коллимирующего объектива [1, 2]. Благодаря этому такие схемы стали находить свое применение в том числе в коллиматорных прицелах [3]. В работе проведено исследование волновода в виде плоскопараллельной подложки с нанесенными на ее поверхность тремя рельефно-фазовыми дифракционными решетками: M1 для ввода излучения, промежуточную M2 и M3 для вывода излучения (рис. 1). Особенностью предложенной схемы является то, что прицельная марка представляет собой проекцию изображения источника излучения (лазерного диода) [3].

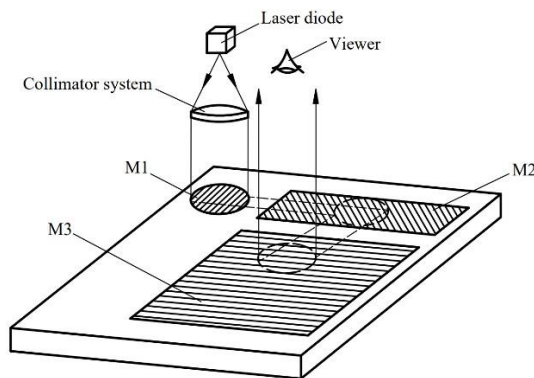
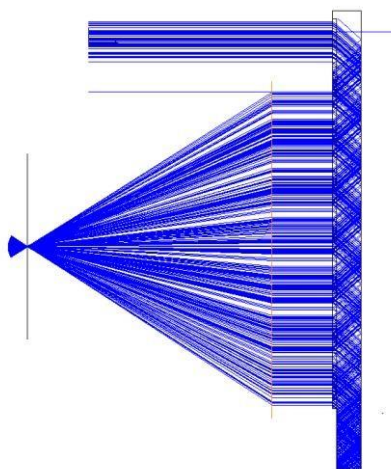


Рис. 1. Схема работы коллиматорного прицела на основе волновода

Необходимо отметить, что при таком подходе к получению прицельной марки, на качество ее изображения будут оказывать влияние различные ошибки изготовления подложки волновода, а именно: клиновидность, ошибки формы и т.п., - которые (т.к. излучение проходит в подложке при полном внутреннем отражении, как было указано выше) могут привести к изменению углов распространения излучения внутри подложки, а значит и на выходе из нее, что приведет к возникновению соответствующих aberrаций. Для оценки влияния различных ошибок и погрешностей изготовления подложки в работе было проведено моделирование голографического волновода в системе автоматизированного проектирования Zemax (рис.2) со следующими параметрами: материал – стекло марки К8, периоды дифракционных решеток М1, М2 и М3 – 620, 480 и 620 нм соответственно, толщина волновода – 2 мм, диаметр зрачка коллимирующего объектива – 6 мм, размер выводной области излучения (решетки М3) – 20 x 20 мм, источник излучения – лазерный диод ADL-65052TL с длиной волны 650 нм.

Для моделирования волновода в Zemax был использован непоследовательный режим работы, который подразумевает отсутствие последовательности между объектами, через которые проходят лучи. Объекты в таком режиме могут обладать любой геометрией, для них задается расположение в пространстве, материал и свойства поверхностей. Для моделирования системы глаза был использован параксиальный объектив с фокусным расстоянием 22 мм и матричный приёмник излучения, регистрирующий изображение точки.



**Рис. 2.** Моделирование голографического волновода в Zemax: распространение излучения в пластине без ошибок

В результате проведён анализ размера изображения прицельной марки в зависимости от клиновидности, а также от местной и общей ошибок поверхности  $N$ ,  $\Delta N$  подложки. Анализ показал, что при распространении излучения в пластине без отклонений формы поверхности и толщины, размер изображения прицельной точки составляет порядка трёх угловых минут. При введении в модель волновода ошибок наблюдается увеличение и искажение пятна рассеяния.

Для схемы коллиматорного прицела на основе голографического волновода, как показано на рис. 1, оптимальными параметрами подложки являются следующие: клиновидность не более 3 угловых минут, общая ошибка формы поверхности – не более 4 колец, местная – не более 0,5 кольца. В этом случае размер точки прицельной марки не превышает 5 угловых минут.

### Список источников

- [1] Одинокоев С. Б. и др. Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 9 (9). – С. 18.
- [2] Betin A. Y. et al. A combination of computer-generated Fourier holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system //Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. – Optical Society of America, 2015. – С. DW2A. 20.
- [3] Grad Y. A. et al. Analysis of light-guide parameters for multicolor augmented reality indicator based on DOEs //Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications V. – SPIE, 2018. – Т. 10679. – С. 453-459.

## Simulation of a holographic waveguide for a collimator sight

*O. L. Afanaseva, A. B. Solomashenko, V. A. Kulin*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In this research, the implementation of a holographic waveguide for a collimator sight is proposed. Its simulation was carried out in the Zemax computer-aided design system, the size of the sighting point in the image plane was analyzed depending on the technological errors of manufacturing the surface of the waveguide substrate: wedge shape, general and local errors of the shape  $N$ ,  $\Delta N$ . As a result, the requirements for tolerances in the manufacture of the waveguide, as well as for its thickness, are formulated, the results of studies of its main parameters are presented.

*Keywords:* Holographic waveguide, Collimator sight, Diffraction gratings.

# Голографическая запись на базе двумерных рельефов на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур

Д. А. Синева, Я. М. Андреева, А. Р. Суворов  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Продемонстрирована запись прототипов защитных знаков на тонких пленках титана и диоксида титана, обладающих дисперсионными и поляризационными характеристиками с изменением цвета в зависимости от угла наблюдения. На пленках титана показана возможность формирования линейно-упорядоченных, ортогональных и гексагональных рельефов. Направление уклона одномерного рельефа, как и углы между осями симметрии двумерных решеток полностью управляемы и зависят от угла поворота плоскости поляризации записывающего излучения. На пленках диоксида титана, импрегнированных наночастицами серебра, в свою очередь, показана возможность формирования как одномерных, так и двумерных рельефов в зависимости от параметров лазерной записи (плотности энергии и скорости построчного сканирования).

*Ключевые слова:* Оптика, Дифракционные оптические элементы, ЛИППС, Лазерная физика, Тонкие пленки, Защитные знаки, Цветная лазерная маркировка.

*Цитирование:* Синева, Д. А. Голографическая запись на базе двумерных рельефов на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур / Д. А. Синева, Я. М. Андреева, А. Р. Суворов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 197–200.

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) – это явление, заключающееся в образовании на поверхности материала совокупности периодических рельефов под действием лазерного излучения. Появление этих структур носит универсальный характер, исследователи изучают их получение на массивных металлах [1] и металлических плёнках [2], полупроводниках [3] и диэлектриках [4]. Высокий интерес к ЛИППС обусловлен широкой применимостью в различных областях науки, техники, включая медицину и оптику. Большое количество работ посвящено использованию ЛИППС для управления гидрофильными и гидрофобными свойствами поверхностей материалов [5–6], также такие структуры вполне успешно применяются для создания антибактериальных покрытий или для лучшего внедрения имплантата в организме [7].

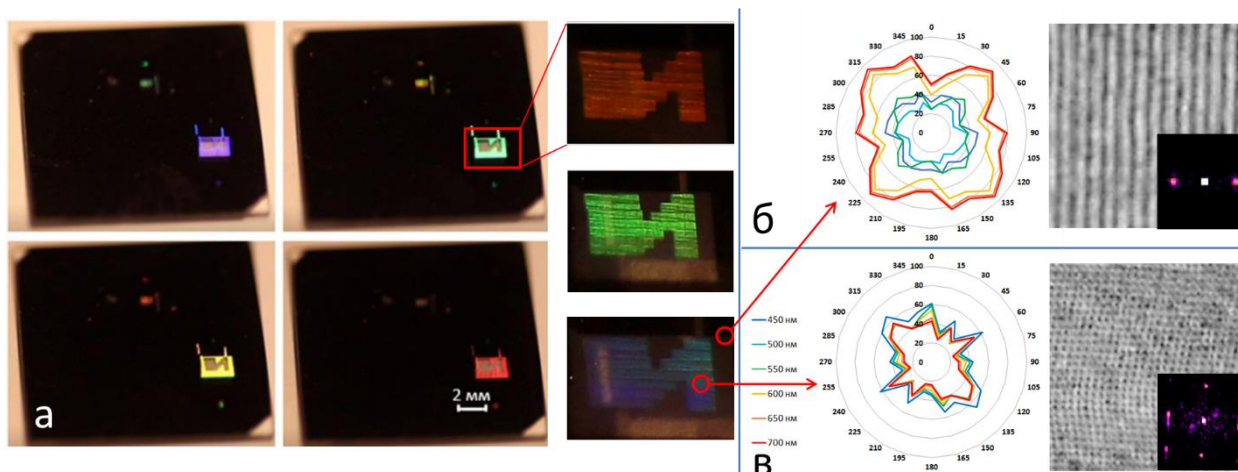
Субмикронный период получаемых решёток позволяет с их помощью вполне успешно управлять оптическими свойствами поверхности. Благодаря использованию линейно поляризованного лазерного излучения имеется возможность управлять ориентацией и топологией получающихся решёток, что позволяет использовать их для записи функциональных фотонных элементов типа радужных голограмм заданной конфигурации, в качестве естественного продолжения и развития существующих методов современной голографической записи [8].

В настоящей работе продемонстрирована успешная запись ЛИППС на тонких плёнках титана, а также на тонких пористых плёнках диоксида титана, импрегнированные ионами, молекулярными кластерами и наночастицами серебра, нанесённых на диэлектрические подложки. На основе одномерных рельефов получены двумерные решётки, представляющие собой суперпозицию двух различно ориентированных ЛИППС в одной области. Двумерные структуры обладают оптическими свойствами, отличными как от необработанной плёнки, так и от одномерного рельефа. Процесс записи производился на лазерном комплексе МиниМаркер2 с иттербиевым волоконным лазером в качестве источника с центральной длиной волны  $\lambda = 1,07$  мкм (для пленок титана) и 355 нм (третья гармоника, для пленок диоксида титана). Выявлены рабочие режимы записи периодических рельефов, составившие:

- на пленках титана на жестких кварцевых подложках (выявленные температурные режимы составляют порядка 450–700 °С к моменту окончания первого импульса), необходимая плотность энергии 0,04 – 0,07 Дж/см<sup>2</sup>, необходимое число импульсов не менее 15 тысяч, частота следования импульсов 40 - 60 кГц, при длительности импульсов 4 нс и скоростях сканирования порядка 0,1 мм/с);

- на пленках диоксида титана, легированных наночастицами серебра на жестких стеклянных подложках (плотности энергии 0,11–0,3 Дж/см<sup>2</sup> для низкочастотных ЛИППС (период порядка  $1\lambda$ ) и 0,11–0,18 Дж/см<sup>2</sup> для высокочастотных ЛИППС (период порядка  $0,5\lambda$ ), необходимое число импульсов порядка 10 - 100, длительности импульсов 1,5 нс, частота следования импульсов 300 кГц, при скоростях сканирования 50–300 мм/с для высокочастотных ЛИППС и 400–500 мм/с для низкочастотных ЛИППС.

Для пленок титана показана возможность формирования линейно-упорядоченных (одномерных) рельефов с периодом порядка  $0,7\lambda$ , ортогональных (двумерных) рельефов с периодом порядка  $0,7\lambda$  по обеим осям симметрии, и гексагональных (двумерных) рельефов с периодом порядка  $0,7\lambda$  по одной (основной) и порядка  $0,5-0,7\lambda$  по двум другими осям. Направление уклона одномерного рельефа, как и углы между осями симметрии двумерных решеток полностью управляемы и зависят от угла поворота плоскости поляризации излучения записывающего пучка (для двумерных решеток - от разницы между углами поворота плоскостей поляризации при первом и втором этапе записи). Проведен анализ физико-химических характеристик записанных структур методами просвечивающей электронной микроскопии и рамановской спектроскопии, изучены оптические свойства рельефов в отраженном естественном и поляризованном свете (рисунок 1). Результаты проведенного исследования позволяют говорить о существенных перспективах выявленных режимов записи упорядоченных структур для решения задач цветной маркировки, записи защитных знаков, отражательных поляризаторов и функциональных элементов фотоники.



**Рис. 1.** (а) Прототип защитного знака, записанный на тонкой пленке титана при различных углах освещения естественным светом. Фон рисунка сформированным одномерным рельефом, символ – двумерным ортогональным рельефом. Результаты микроскопии структур и диаграммы интенсивности отраженного света при измерении в скрещенных поляризаторах в зависимости от угла поворота структуры приведены на рисунках (б) и (в) соответственно; на врезках приведены результаты 2Д-БПФ анализа соответствующих изображений.

### Благодарность

Исследование поддержано грантом РФФ № 21-79-10241.

### Список источников

- [1] Okamuro K. et al. Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation // *Physical Review B*. – 2010. – Т. 82. – №. 16. – С. 165417.
- [2] Sinev D. A. et al. Formation of the Submicron Oxidative LIPSS on Thin Titanium Films During Nanosecond Laser Recording // *Nanomaterials*. – 2020. – Т. 10. – №. 11. – С. 2161.
- [3] Costache F., Kouteva-Arguirova S., Reif J. Sub-damage-threshold femtosecond laser ablation from crystalline Si: surface nanostructures and phase transformation // *Applied Physics A*. – 2004. – Т. 79. – №. 4. – С. 1429–1432.
- [4] Höhm S. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on silica // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – Т. 112. – №. 1. – С. 014901.
- [5] Baldacchini T. et al. Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser // *Langmuir*. – 2006. – Т. 22. – №. 11. – С. 4917–4919.
- [6] Varlamova O. et al. Modification of surface properties of solids by femtosecond LIPSS writing: comparative studies on silicon and stainless steel // *Applied Physics A*. – 2017. – Т. 123. – №. 12. – С. 1–6.
- [7] Orazi L. et al. Osteoblast cell response to LIPSS-modified Ti-implants // *Key Engineering Materials*. – Trans Tech Publications Ltd, 2019. – Т. 813. – С. 322–327.
- [8] А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. А. Бабин. ЛИППС на объемных образцах и тонких пленках металлов: формирование, постобработка и возможные применения в качестве дифракционных микрорешеток. Голография. Наука и практика : XIV международная конференция HOLOEXPO. Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС». – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, С. 122 – 126.



# Holographic recording based on 2D reliefs by laser-induced surface periodic structures

*D. Sinev, Y. Andreeva, A. Suvorov*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Prototypes of security signs were recorded on thin titanium and titanium dioxide films, with dispersion and polarization characteristics depending on the viewing angle. On titanium films, the possibility of forming linearly ordered, orthogonal, and hexagonal reliefs is shown. The direction of the slope of the one-dimensional relief, as well as the angles between the symmetry axes of the two-dimensional gratings, are completely controllable and depend on the angle of rotation of the polarization plane of the recording radiation. On titanium dioxide films impregnated with silver nanoparticles, in turn, the formation of both one- and two-dimensional reliefs depends on the parameters of laser writing (energy density and line scanning speed).

*Keywords:* Optics, Diffractive optical elements, LIPSS, Laser physics, Thin films, Security signs, Colour laser marking.

# Анализ допусков при формировании двумерных скрещенных решеток при лазерной литографии и программная коррекция режимов записи

В. П. Корольков<sup>1</sup>, А. Г. Седухин<sup>1</sup>, Р. И. Куц<sup>1,2</sup>, Д. А. Белоусов<sup>1</sup>, В. В. Черкашин<sup>1</sup>, С. К. Голубцов<sup>1</sup>,  
А. Р. Саметов<sup>1</sup>, А. И. Малышев<sup>1</sup>, А. Е. Качкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Одно- и двумерные решетки с компьютерно-генерируемой бинарной фазовой структурой в настоящее время широко используются во многих приложениях для разделения лазерного луча на несколько порядков дифракции. На характеристики таких дифракционных оптических элементов большое влияние оказывает искажение их топологии при изготовлении. Были проанализированы допуски на формирование бинарно-фазовых решеток, формирующих матрицу дифракционных порядков  $7 \times 7$  и со структурой, разделяемой на X- и Y-составляющие. Исследованы ошибки топологии прямолинейных микроструктур при прямой лазерной записи на круговой лазерной записывающей системе. Для компенсации искажений, возникающих из-за особенностей процесса термохимического окисления на границах микроэлементов, предложена упрощенная методика программной коррекции размеров микроэлементов. Определены допуски на лазерную запись решеток, обеспечивающие получение решеток с среднеквадратичной ошибкой отклонения интенсивности полезных порядков дифракции менее 8%.

*Ключевые слова:* Лазерная литография, Скрещенные дифракционные решетки, среднеквадратичная ошибка интенсивности порядков, корректировка размеров микроэлементов.

*Цитирование:* Корольков, В. П. Анализ допусков при формировании двумерных скрещенных решеток при лазерной литографии и программная коррекция режимов записи / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, Р. И. Куц, Д. А. Белоусов, В. В. Черкашин, С. К. Голубцов, А. Р. Саметов, А. И. Малышев, А. Е. Качкин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 201–206.

## Введение

В настоящее время, в технике оптического приборостроения и экспериментальных научных исследованиях широкое применение находят решетки Даммана [1, 2]. В подавляющем большинстве приложений, основной функцией таких решеток является высокоэффективное и помехоустойчивое одномерное либо двумерное расщепление лазерного пучка на пространственно-изолированные регулярные массивы пучков с равными интенсивностями. Стандартные, наиболее распространенные, формы рассматриваемых решеток имеют вид планарных одномерных либо двумерных скрещенных дифракционных решеток со специально-рассчитанными псевдoreгулярными бинарно-фазовыми профилями их структуры в главных поперечных сечениях. На практике, данные структуры получают с помощью технологий электронно-лучевой либо лазерной сканирующей литографии.

Основными техническими параметрами этих решеток являются общая световая эффективность в полезных центральных порядках дифракции и разброс интенсивностей полезных порядков, который обычно определяется как отношение максимальной интенсивности в полезных порядках к минимальной интенсивности либо как среднеквадратическое отклонение (СКО) данных порядков. Многолетний опыт авторов данной работы по расчету и практическому изготовлению решеток рассматриваемого вида для оптического и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн [3–4] показывает, что основным «камнем преткновения» при компьютерном лазерно-литографическом изготовлении решеток является удовлетворение жестким допускам на точность воспроизведения структуры решеток, как по их поверхностной планарной топологии, так и по глубине фазового профиля. Несмотря на совершенствование современных технологий изготовления решеток, реализуемые на практике структуры коммерчески-доступных решеток и характеристики этих решеток [7] все еще не являются достаточно близкими приближениями к расчетным структурам и характеристикам идеальным решеток. Также, по технологическим причинам, не всегда представляется возможным само изготовление заказных решеток с желаемыми параметрами. В этой связи, совершенствование лазерных технологий записи решеток и поиск новых улучшенных режимов их записи представляется достаточно востребованным. В данной работе рассматриваются ошибки топологии микроэлементов скрещенной решетки Даммана, возникающих при прямой лазерной записи на тонких пленках хрома методом термохимического окисления.

### 1. Искажения топологии структур

Термохимическая лазерная запись скрытого изображения микроструктур на пленке хрома осуществлялась на установке CLWS-300IAE [8] с длиной волны записывающего лазера 532 нм и диаметром пятна (FWHM) ~0,7 мкм. Проявление скрытого изображения осуществлялось с помощью жидкостного селективного травителя хрома на основе красной кровяной соли. Время проявления, влияющее на итоговую скважность хромовой маски, контролировалось методом регистрации нулевого дифракционного порядка от встроенной тестовой одномерной бинарной решетки.

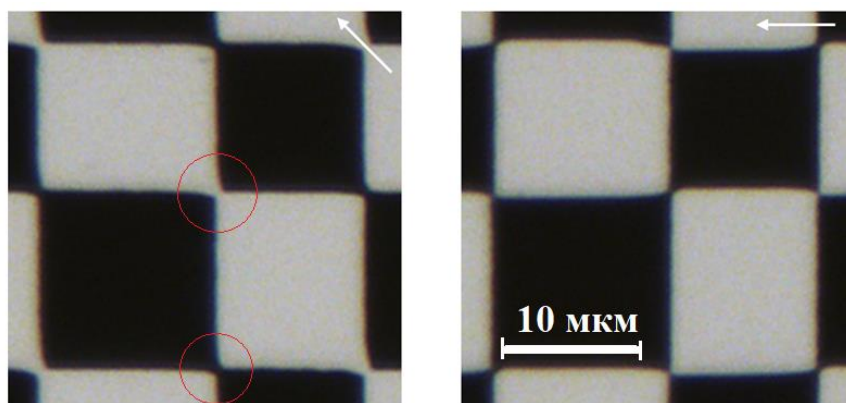
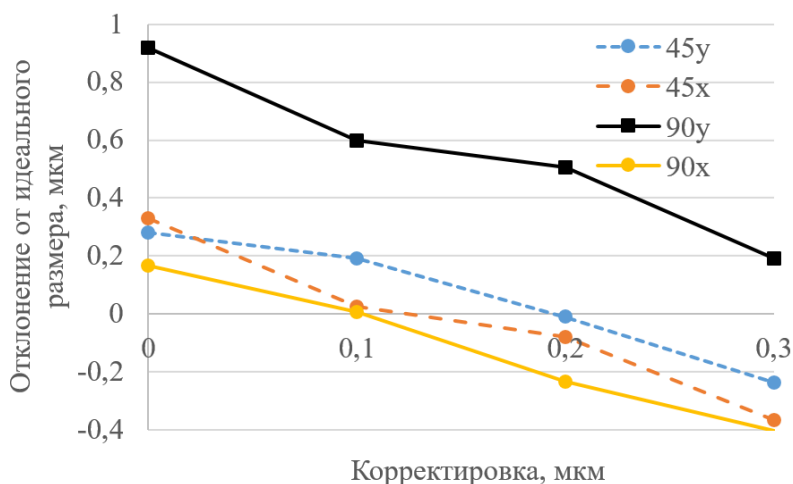


Рис. 1. Микрофотография дифракционных зон решетки Даммана

На первом этапе эксперимента, после проявления первого образца с решеткой Даммана, было выявлено наличие искажений топологии микроэлементов решетки. Эти искажения зависят от угла входа лазерного трека в границу микроэлементов и возникают из-за термоэффектов при лазерной записи на угловых стыках дифракционных зон. Пример микрофотографий дифракционных зон показаны на рис. 1. Красными окружностями показаны искаженные участки, стрелками – направления хода записывающего лазерного пучка. Также было определено, что данные искажения эффективно уширяют геометрические границы дифракционных зон. Исходя из этого была предложена коррекция формы, представляющая собой равномерное сжатие размеров микроэлементов.

## 2. Коррекция размеров структуры

Следующим этапом была проведена лазерная запись серии решеток Даммана с корректировкой каждой границы микроэлемента 0-0,5 мкм с шагом 0,1 мкм в сторону уменьшения размеров (суммарно линейные размеры каждого микроэлемента уменьшались до 1 мкм). Для каждой величины корректировки были записаны две дифракционные решетки — под углами 45° и 90° к ходу записывающего лазерного пучка, как два граничных случая при записи скрещенной структуры на установке лазерной записи с полярной системой координат. Время проявления, как уже было сказано, контролировалось путем достижения определенного заранее выбранного уровня интенсивности нулевого порядка тестовой одномерной бинарной решетки.



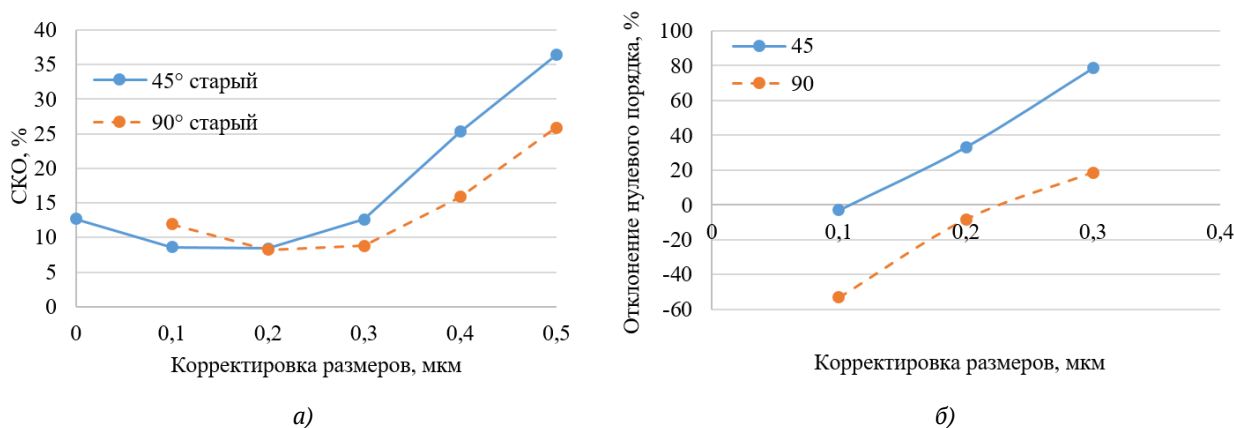
**Рис. 2.** Отклонение поперечных размеров микроэлементов

На рисунке 2 показаны графики зависимости отклонений поперечных размеров элементов по двум направлениям (X – вдоль траектории лазерного луча, Y – перпендикулярно траектории) и для двух углов вхождения 45° и 90°. Из графиков видно, что при отсутствии корректировки размеры микроэлементов увеличены на 0,2-0,3 мкм от расчетного значения. Кроме того, наибольшее отклонение (~0,9 мкм) от расчетного значения имеет поперечный размер структур при записи под углом 90°. На этот размер влияет эффект теплового уширения треков.

Чтобы приблизить топологию реально получаемых микроэлементов к расчетной топологии решетки Даммана, необходимо вносить так называемую динамическую коррекцию при записи микроэлементов. Такая оптимизация может представлять собой корректировки, как размера микроэлементов, так и их формы. Кроме того, данная коррекция будет учитывать угол и радиус (скорость) записи. Предположительно, коррекция должна представлять собой изменение мощности записи в начале каждого трека для более быстрой активации процесса термохимического окисления. Реализация данной коррекции требует большого объема памяти вычислительной части лазерной записывающей системы и дальнейших научных исследований по подбору параметров корректировки. По этой причине в нашем исследовании была использована только вышеописанная корректировка размеров микроэлементов.

### 3. Получение оптимального размера корректировки

Для определения оптимальной корректировки размера микроэлементов были получены данные СКО по всем пучкам матрицы 7x7, создаваемым дифракционной решеткой, в зависимости от величины корректировки. Данные зависимости представлены на графике 3а.



**Рис. 3.** Зависимости СКО от величины корректировки размера: а) СКО главных дифракционных порядков для углов записи 45° и 90°; б) отклонения нулевого порядка.

Видно, что зависимости для углов вхождения лазерного трека в границы микроэлементов, как 45° так и 90°, имеют минимумы. Смещение этих минимумов объясняется тем, что при угле записи 90°, при котором треки становятся перпендикулярными одним границам микроэлемента и параллельными другим, эффективный размер микроэлемента, как уже было сказано, увеличивается за счет температурного уширения трека в поперечном направлении. При угле 45° такого не наблюдается, т. к. две смежных границы сформированной маски дифракционной зоны состоят из точек включения лазерного экспонирования, в которых, в свою очередь, происходит задержка формирования оксидного следа вследствие конечного постепенного нагревания пленки хрома под воздействием излучения. Основной вклад в зависимости СКО вносит отклонение интенсивности нулевого порядка от среднего. Данные отклонения интенсивности нулевого порядка в зависимости от величины корректировки размеров представлены на рис. 3б.

Полученные зависимости СКО от корректировки позволяют определить оптимальную величину корректировки, равную  $-0,2$  мкм с каждой стороны микроэлемента. Таким образом, при данной корректировке и при повторяемом контроле времени проявления последующих элементов можно достигнуть СКО всех главных дифракционных порядков решетки Даммана, формирующей матрицу пучков  $7 \times 7$ , на уровне ниже 8%.

### Заключение

При прямой лазерной записи скрещенных дифракционных решеток на круговых лазерных записывающих системах необходимо учитывать искажения топологии структур, возникающие из-за особенностей процесса термохимического окисления. Для эффективного устранения искажений топологии необходимо реализовать программные коррекции, зависящие от угла и скорости записи, что требует больших вычислительных мощностей записывающей установки. Была предложена и реализована программная корректировка, представляющая собой равномерное сокращение размеров микроэлементов. При данной конфигурации параметров лазерной записи было получено оптимальное значение корректировки, равное  $-0,2$  мкм с каждой стороны микроэлемента. Таким образом, при данной корректировке и при повторяемом контроле времени проявления последующих элементов можно достигнуть СКО всех главных дифракционных порядков решетки Даммана, формирующей матрицу пучков  $7 \times 7$ , на уровне ниже 8%.

### Благодарность

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (№ гос. регистрации 121041500060-2). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании.

### Список источников

- [1] **Dammann, H.** High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms / H. Dammann, K. Görtler. //Optics communications. – 1971. – Vol. 3. – №. 5. – P. 312-315
- [2] **Dammann, H.** Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures / H. Dammann, E. Klotz //Optica Acta: International Journal of Optics. – 1977. – Vol. 24. – №. 4. – P. 505-515
- [3] **Bessmeltsev V. P.** et al. Compact absolute shaft angular encoder based on diffractive optical elements //Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. – SPIE, 2002. – Vol. 4900. – P. 941-945
- [4] **А.Г. Седухин** и С.А. Бреднихин, Труды 7-ой Междунар. конф. «Прикладная оптика – 2006». – 2006. – № 3. – P. 253–257
- [5] **Полещук, А. Г.** Многопучковая лазерная запись дифракционных оптических элементов / А. Г. Полещук, А. Р. Саметов, А. Г. Седухин //Автометрия. – 2012. – Т. 48. – №. 4. – С. 3-11
- [6] **Вейко, В. П.** Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур / В. П. Вейко, Д. А. Синёв, Е. А. Шахно, А. Г. Полещук, А. Р. Саметов, А. Г. Седухин // Компьютерная оптика. – 2012. – Т.36, №4. – С.562-571
- [7] <https://www.holoor.co.il/product/gratings/>
- [8] **Poleshchuk A. G.** et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure //Applied Optics. – 1999. – Т. 38. – №. 8. – С. 1295-1301.

# Analysis of tolerances in the formation of two-dimensional crossed gratings in laser lithography and software correction of writing modes

*V. P. Korolkov<sup>1</sup>, A. G. Sedukhin<sup>1</sup>, R. I. Kuts<sup>1,2</sup>, D. A. Belousov<sup>1</sup>, V. V. Cherkashin<sup>1</sup>, S. K. Golubtsov<sup>1</sup>, A. R. Sametov<sup>1</sup>, A. I. Malyshev, A. E. Kachkin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electromertry SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

One- and two-dimensional gratings with a computer-generated binary phase structure are currently widely used in many applications for separating a laser beam into several diffraction orders. The characteristics of such diffractive optical elements are greatly affected by the distortion of their topology during manufacture. The tolerances for the formation of binary-phase gratings that form a matrix of diffraction orders  $7 \times 7$  and with a structure divided into X- and Y-components were analyzed. The topology errors of rectilinear microstructures are studied during direct laser writing on a circular laser writing system. To compensate for distortions arising from the peculiarities of the process of thermochemical oxidation at the boundary of microelements, a method for programmatic correction of microelement sizes is proposed. The tolerances for laser writing of gratings are determined, which ensure the production of gratings with a root-mean-square error in the deviation of the intensity of useful diffraction orders of less than 8%.

*Keywords:* Laser lithography, Crossed diffractive gratings, RMS error of order intensity, Microelement size correction.

# Применение лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для изготовления цифровых радужных голограмм

*М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Н. А. Афанасьев, А. Р. Веласкес, Д. А. Синева, Г. В. Одинцова*  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен метод записи радужных голограмм на поверхности нержавеющей стали 08X18H10, основанный на формировании лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС). Под действием прямого излучения волоконного наносекундного лазера с длиной волны 1,06 мкм и частотой следования импульсов от 20 до 100 кГц были сформированы ЛИППС, представляющие собой модулированный рельеф с микронным периодом и высотой модуляции порядка 100 нм. Подбор параметров лазерного воздействия позволяет формировать как нерегулярные структуры, так и высокоупорядоченные решетки внутри лазерных отпечатков. Нерегулярные структуры могут выступать как случайные структурные элементы, а упорядоченные структуры формируют визуально наблюдаемые, плавно изменяющиеся цвета или цветовые оттенки, и элементы переключения цвета по изображению в зависимости от ракурсов наблюдения.

*Ключевые слова:* Радужная голограмма, Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), Нержавеющая сталь.

*Цитирование:* Москвин, М. К. Применение лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для изготовления цифровых радужных голограмм / М. К. Москвин, Е. В. Прокофьев, Н. А. Афанасьев, А. Р. Веласкес, Д. А. Синева, Г. В. Одинцова // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 207–210.

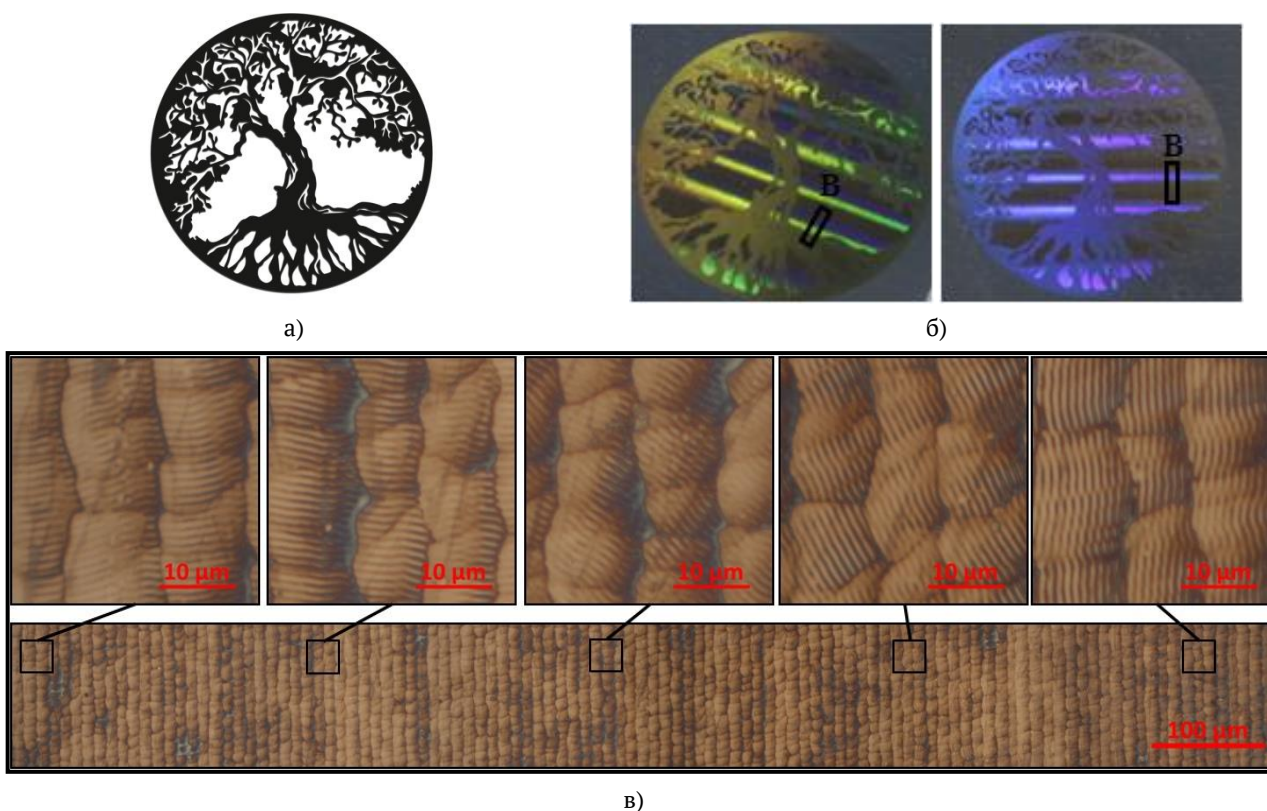
Впервые лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС) наблюдались Бирнбаумом в 1965 году [1]. ЛИППС формируются вследствие интерференции падающей волны и возбужденной поверхностной электромагнитной волны на шероховатостях поверхности [2]. Управляя параметрами лазерного воздействия возможно контролировать глубину, период и ориентацию ЛИППС. Пространственную ориентацию ЛИППС возможно регулировать, изменяя направление поляризации лазерного излучения [3], период — изменяя угол падения излучения [4], а глубины структур — управляя плотностью энергии [5]. Данные структуры были получены на поверхности всех типов материалов: металлах [6], полупроводниках [7], диэлектриках [8] и полимерах [9]. В последнее время ЛИППС находят свое применение во многих отраслях науки и техники благодаря возможности функционализации поверхности, а именно управление смачиваемостью [10,11], оптическими [12] и триоблогическими свойствами поверхности [13], а также ЛИППС способствует пролиферации и миграции клеток [14].

В настоящей работе мы рассматриваем оптические свойства поверхностного слоя функционального материала (поверхности нержавеющей стали) со сформированным покрытием на основе ЛИППС и их применение для записи радужных голограмм на. Эксперименты проводились на пластинах нержавеющей стали 08X18H10, толщина пластинки



составляла 0,5 мм, средняя шероховатость поверхности  $R_a = 0,02$  мкм,  $R_z = 0,18$  мкм. Лазерное воздействие проводилось на воздухе при нормальных условиях при помощи волоконного наносекундного импульсного лазера с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм, длительностью импульса от 4 до 100 нс, частотой следования импульсов от 20 до 100 кГц в технологической лазерной установке МиниМаркер 2-20А4 (ООО «Лазерный Центр», Россия). Состояние поляризации контролировалось при помощи дополнительно установленной призмы Глана-Тейлора, работающей как линейный поляризатор, и установленных полуволновой пластинки или четвертьволновой пластинки. Пучок входил в систему двухосевого гальвосканера и попадал на объектив плоского поля (фокусное расстояние 216 мм). Диаметр пучка в области обработки на уровне  $1/e^2$  составлял порядка 50 мкм. Полуволновая пластинка устанавливалась на круговой вращатель, синхронизированный с гальвосканером для контроля направления линейной поляризации излучения. Было реализовано два режима сканирования. Первый – поляризация неизменна во время сканирования, что позволяет формировать области любой конфигурации с неизменной ориентацией структур. Второй – вращение линейной поляризацией с постоянной скоростью во время лазерного сканирования, что позволяет формировать области с плавным изменением пространственной ориентации структур. Четвертьволновая пластинка использовалась для изменения поляризации излучения от линейной к круговой поляризации и записи случайного структурного элемента.

Для записи итоговой радужной голограммы на поверхности стали было использовано растровое изображение, результат записи показан рис. 1. Оптимальные параметры записи составили,  $\tau = 50$  нс, скорость повторения импульса  $\nu = 35$  кГц, скорость сканирования  $V = 35$  мм/с, шаг сканирования  $d = 5$  мкм и плотность энергии в лазерном импульсе  $E = 3,5$  Дж/см<sup>2</sup>, плотность мощности составила  $q = 6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Вводное изображение поделено на слои сканирования. Каждый цвет обеспечивает уникальную пространственную ориентацию ЛИППС в отдельном сегменте изображения. Градиент цвета соответствует плавному изменению ориентацию ЛИППС, что было достигнуто непрерывным поворотом линейной поляризации, с круговой скоростью вращения 2 град/с, во время лазерного сканирования.



**Рис. 1.** Радужная голограммы на поверхности нержавеющей стали 08X18H10: а) входное растровое изображение; б) записанное изображение на поверхности стали 08X18H10, в) микрофотография области с изменением пространственной ориентации ЛИППС

Предложен метод прямой лазерной записи изображений за счет формирования ЛИППС на поверхности нержавеющей стали. Данный метод представляет интерес для создания радужных голограмм, интегрированных в металлические изделия. Тщательный контроль параметров лазерного воздействия позволяет формировать как нерегулярные структуры внутри лазерных отпечатков, так и высоко упорядоченные решетки. Нерегулярные структуры могут выступать как случайные структурные элементы, а упорядоченные структуры формируют визуально наблюдаемые, плавно изменяющиеся цвета или цветовые оттенки и элементы переключения цвета по изображению в зависимости от ракурсов наблюдения.

### Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, Проект № 21-79-10241

### Список источников

- [1] Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers //Journal of Applied Physics. – 1965. – Т. 36. – №. 11. – С. 3688-3689.
- [2] Bonse J. et al. Laser-induced periodic surface structures—A scientific evergreen // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2016. – Т. 23. – №. 3.
- [3] Dusser B. et al. Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking // Optics express. – 2010. – Т. 18. – №. 3. – С. 2913-2924.

- [4] Ionin A. A. et al. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces // Applied Physics A. – 2012. – T. 107. – №. 2. – C. 301-305.
- [5] Tan B., Venkatakrishnan K. A femtosecond laser-induced periodical surface structure on crystalline silicon // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2006. – T. 16. – №. 5. – C. 1080.
- [6] Vorobyev A. Y., Guo C. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals // Applied Physics A. – 2007. – T. 86. – №. 3. – C. 321-324
- [7] Bonse J. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures // Journal of Laser Applications. – 2012. – T. 24. – №. 4. – C. 042006.
- [8] Gräf S., Kunz C., Müller F. A. Formation and properties of laser-induced periodic surface structures on different glasses // Materials. – 2017. – T. 10. – №. 8. – C. 933.
- [9] Rebollar E., Castillejo M., Ezquerro T. A. Laser induced periodic surface structures on polymer films: From fundamentals to applications // European Polymer Journal. – 2015. – T. 73. – C. 162-174.
- [10] Long J. et al. Superhydrophobic and colorful copper surfaces fabricated by picosecond laser induced periodic nanostructures // Applied Surface Science. – 2014. – T. 311. – C. 461-467.
- [11] Zhang Y. et al. Vacuum brazing of alumina to stainless steel using femtosecond laser patterned periodic surface structure // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – T. 662. – C. 178-184.
- [12] Vorobyev A. Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. – 2008. – T. 92. – №. 4. – C. 041914.
- [13] Bonse J. et al. Tribological performance of sub-100-nm femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium // Applied Surface Science. – 2016. – T. 374. – C. 190-196.
- [14] Martínez-Calderon M. et al. Surface micro- and nano-texturing of stainless steel by femtosecond laser for the control of cell migration // Scientific reports. – 2016. – T. 6. – №. 1. – C. 1-10.

## **Application of laser-induced periodic surface structures for the design of digital rainbow holograms**

M. Moskvina, E. Prokofiev, N. Afanasev, A. Velazquez, D. Sinev, G. Odintsova

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

A method of forming iridescent holograms on the surface of stainless steel 08X18H10 based on the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) is presented in this report. LIPSS were shaped by direct irradiation of a nanosecond fiber laser with a wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  and a pulse repetition frequency of 20 to 100 kHz. The structures exhibit surface relief modulations with one micron periods and height relief of about 100 nm. Proper selection of the parameters allows to obtain high-ordered gratings and random structures inside the laser spots. Firstly, random structures can act as a fingerprint of the structural elements of an image. Secondly, high-order structures enable the formation of visually observable, smoothly changing colors, or color shades, and elements of color switching across the image depending on the viewing angles.

*Keywords:* Rainbow hologram, Laser-induced periodic surface structures (LIPSS), Stainless steel.

# Пример расчета дифракционной эффективности голограмм с асимметричным профилем полосы

А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

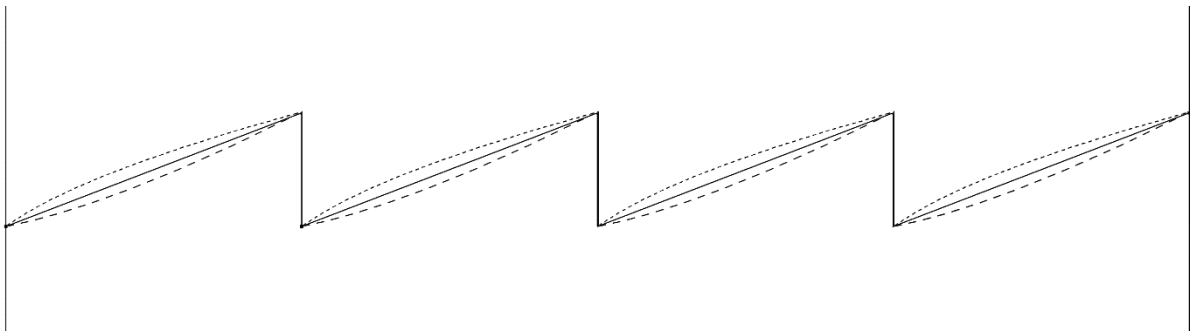
В докладе представлены результаты численного моделирования дифракции света на структурах с асимметричным профилем микрорельефа конечно-разностным методом COMSOL. Учтена неоднородность отклика ЖК модулятора по полю. Предложены рекомендации для достижения желаемого рельефа с учетом нелинейности кривой чувствительности фоторезиста и неоднородности интенсивности освещающего пучка.

*Ключевые слова:* Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы.

*Цитирование:* Смык, А. Ф. Пример расчета дифракционной эффективности голограмм с асимметричным профилем полосы / А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 211–215.

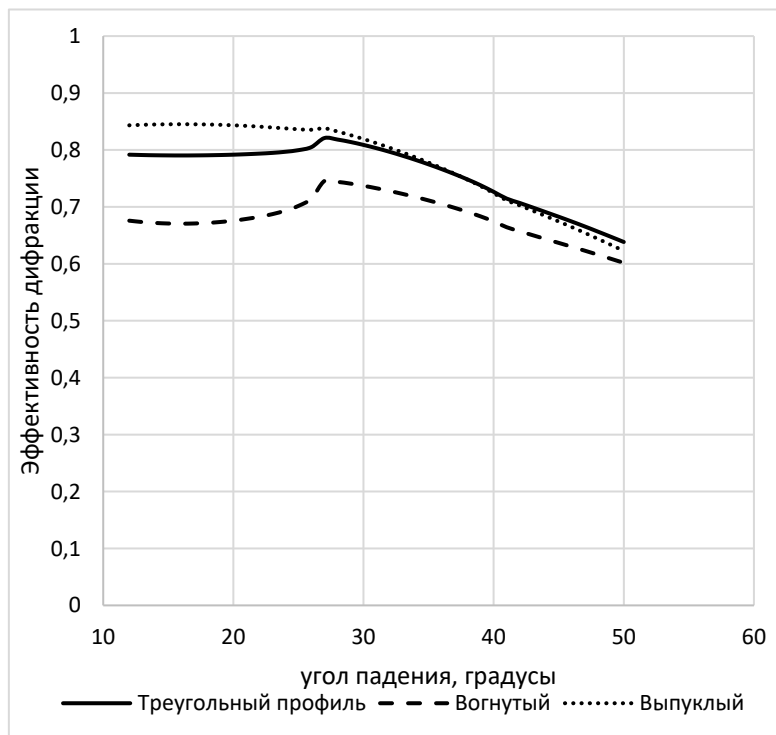
Одним из главных потребительских свойств защитных голограмм является яркость, которая зависит от профиля полосы в поперечном ее сечении. Если голограмма записывается при интерференции монохроматических световых волн, форма профиля полосы близка к синусоидальной. Дифракционная эффективность тогда не превышает 33% [1]. Если профиль полосы приближается к прямоугольному, можно добиться дифракционной эффективности в полезном порядке, близкой к 40% [2]. На практике этого стараются добиться подбором режимов экспонирования и проявления регистрирующей среды. На этом возможности симметричного профиля исчерпываются. В системах типа Дот-матрикс, в которых применяются жидкокристаллические (ЖК) модуляторы излучения и проекционная система для экспонирования фоторезиста, можно попытаться управлять профилем и записать асимметричные рельефы. Если в асимметричном пилообразном профиле угол дифракции от периодической структуры совпадает с отражением нулевого порядка от одной из сторон профиля, яркость в этом порядке радикально увеличивается [3]. Так называемые эшелетты позволяют уменьшить дифракцию во все порядки, кроме одного, тем самым существенно подняв яркость в «полезном» порядке.

Однако, обеспечение высокой эффективности дифракции для желаемого порядка накладывает высокие требования к соблюдению профиля полос. Для изучения влияния технологических факторов было проведено численное моделирование дифракции света на отражающей решетке со строго пилообразным профилем и с искажениями формы, приводящими к выпуклому и вогнутому профилю штриха. Для расчетов использовалось отклонение формы профиля на  $\pm 10\%$ . Примерно к таким отклонениям приводит термическая усадка термопластичных лаков на голографических материалах или усадка вследствие полимеризации мономерного слоя фотополимера. В модели исследовалась дифракционная решетка с периодом 1 мкм, сделанная из алюминия и находящаяся в воздухе (Рис. 1).



**Рис. 1.** Участок треугольной дифракционной решетки. Точками и пунктиром обозначены искаженные профили

В результате расчета дифракционной интенсивности для -1 порядка дифракции в пакете COMSOL выяснилось, что указанное отклонение формы профиля приводит к существенному колебанию яркости (Рис. 2), которое, к тому же, зависит от угла падения освещающего пучка, его отличия от угла блеска.



**Рис. 2.** Дифракционная эффективность -1 порядка дифракции в зависимости от угла падения

Можно видеть, что искажение профиля менее чем на 10% приводит к сопоставимому колебанию яркости наблюдаемой голограммы.

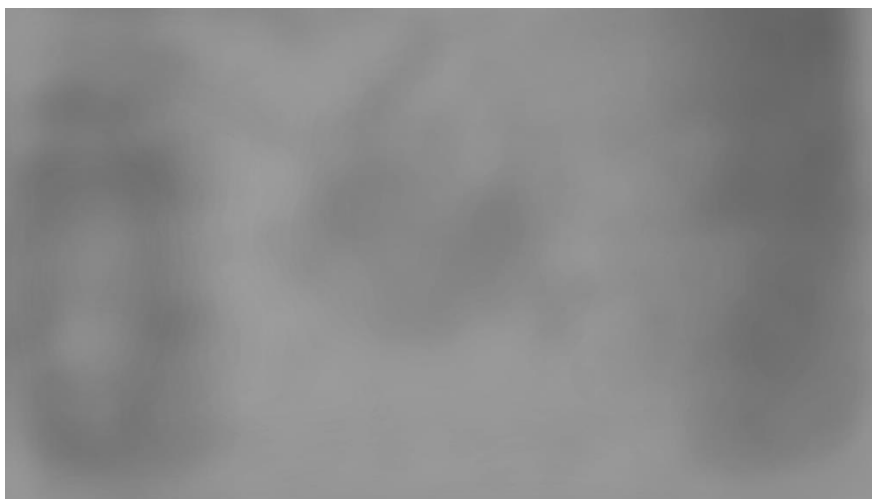
На практике к отклонению формы профиля от желаемой может приводить множество факторов, например, изменение температуры среды, погрешность в длительности проявления, усадка фотополимера в процессе рекомбинации и другие. При этом существенным источником искажений в системах Дот-матрикс может являться сам ЖК

модулятор. Каждый из этих факторов может дополнительно приводить и к неравномерности высоты рельефа, что также негативно скажется на яркости полезного порядка.

Поэтому крайне важно контролировать и либо минимизировать, либо компенсировать вклады каждого этапа производства на форму профиля дифракционных полос.

Современные пространственные модуляторы излучения как правило позволяют корректировать так называемую гамма-кривую в зависимости от потребностей пользователя. Такая операция необходима для обеспечения линейной зависимости между выводимыми градациями серого и фазовым сдвигом. Однако, этого недостаточно, поскольку отклик модулятора еще и неравномерен по площади.

ЖК модулятор типа LCoS HED-6001 [4] помимо настройки гамма-кривой требует дополнительной компенсации неравномерности по полю. На рис. 3 приведено распределение яркости модулированного излучения при том, что на LCoS выводилась равномерная серая заливка с индексом 100 (0- черный, 255- белый).



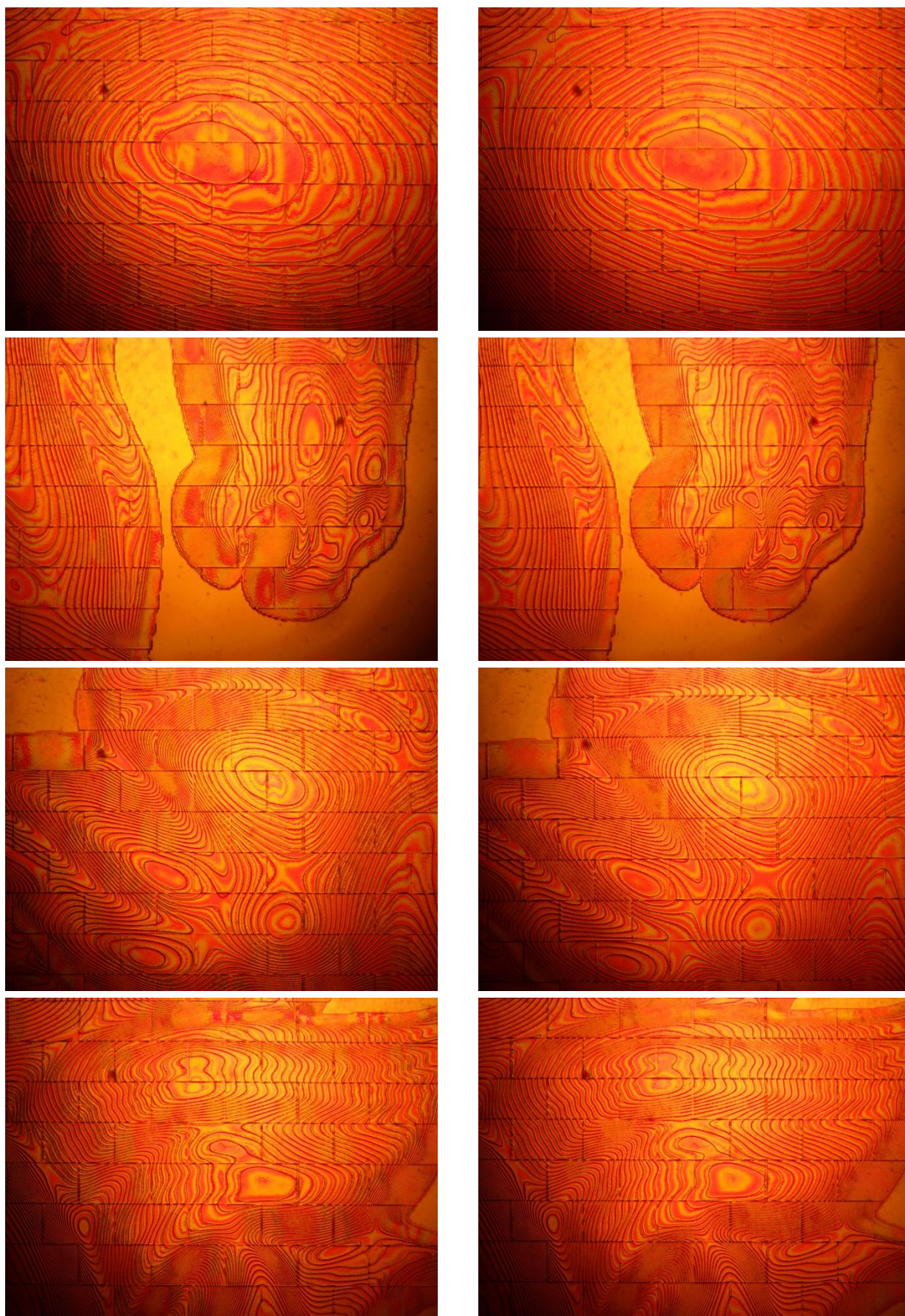
**Рис. 3.** Распределение яркости модулированного излучения

Отклонения яркости от среднего значения для некоторых значений заливки достигало 23%. Соответственно, данную неравномерность необходимо учитывать и корректировать в процессе подготовки проецируемых распределений. Причем, как величина колебаний, так и общая структура «пятен» меняется с изменением величины серого.

Освещение лазерным пучком также неравномерно. Для компенсации этой неравномерности применим тот же подход с коррекцией выводимого серого.

Было обнаружено, что данные ошибки зависят от температуры модулятора излучения. Соответственно, для успешного применения коррекции, особенно, в случаях работы с мощными источниками излучения, необходимо уделить внимание стабилизации температуры рабочей площадки модулятора.

На рис. 4 приведены микрофотографии нескольких участков голограммы с асимметричным профилем без и с коррекцией неравномерности модуляции по полю. Можно видеть, что данный тип коррекции может оказаться необходим, если конкретный ЖК модулятор не обеспечивает достаточной равномерности.



**Рис. 4.** Сравнение результатов записи без коррекции по полю (слева) и после ее применения (справа)

## Заключение

Для обеспечения наибольшей дифракционной эффективности дифракции в полезном порядке целесообразно применять асимметричный профиль и придерживаться рекомендованных пространственных частот, где влияние технологических погрешностей минимально. Компенсационная коррекция неоднородности отклика пространственного модулятора и неоднородности его засветки, а также нелинейности отклика регистрирующей среды необходима при записи ярких и малозумных голограмм.

## Список источников

- [1] А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин. Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах // Мир техники кино. — 2018. — №1(12). — С. 23–30.
- [2] **Collier, R.** Jr Optical Holography / R. Jr Collier, K. Berkhart, L. Lin. Translation from English edited by U.I. Ostrovsky // М.: Mir. — 1973. — P. 258.
- [3] **Stamm, R. F.** Energy distribution of diffraction gratings as function of groove form / R. F. Stamm, N J. Whale // JOSA. — 1946. — Vol 36. — P. 2.
- [4] <https://holoeye.com/lcos-microdisplays/hed-6001-monochrome-lcos/>

## Diffraction efficiency computation for asymmetrical-profile hologram

*A. Smyk, A. Shurygin*

James River Branch LLC, Moscow, Russia

Computer simulations of laser beam diffraction on asymmetrical surface relief is presented. Finite-difference method allowed diffraction pattern distribution computation. Photoresist sensitivity curve and non-uniform laser illumination were taken into account.

*Keywords:* Optics, Holography, Diffraction efficiency, Asymmetrical profile, Microrelief diffraction.



# Конструктивная геометрия системы записи image-matrix голограмм

*В. В. Ткаченко, С. Л. Канделинский*

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Рассматриваются структурные варианты сканирующих систем формирования image-matrix голограмм. Дается сопоставление параметров оптических систем и их элементов для выбора рациональных конструкций.

*Ключевые слова:* Image-matrix голограмма, Оптическая схема, Сканирующая запись.

*Цитирование:* **Ткаченко, В. В.** Конструктивная геометрия системы записи image-matrix голограмм / В. В. Ткаченко, С. Л. Канделинский // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 216–218.

Технология image-matrix позволяет применять современные алгоритмы компьютерной графики в процессе синтеза голографического растра или пост-обработки, создавать различные, в том числе и недоступные для аналоговой оптической голографии, локализованные и распределенные защитные элементы, изображения которых могут быть восстановлены (визуализированы) при особых условиях освещения или с использованием специальных приспособлений и оптических приборов (идентификаторов) [1]. Быстрое наращивание в последние годы вычислительных возможностей компьютерной техники при сохранении их ценовой доступности с использованием сетевых технологий изменило стоимостной баланс между soft-ware и hard-ware в сторону увеличения последней компоненты, так как дальнейшее улучшение изобразительных и повышение защитных свойств image-matrix голограмм зависит только от технических характеристик оптико-механических развертывающих систем и компонентов конструкции голографического принтера.

В докладе рассматриваются варианты конструктивных решений развертывающих и проекционных подсистем голографического принтера с использованием транспарантов на базе LCD и DLP матриц, лазерных и светодиодных источников света для записи голографического растра (далее – пиксельграммы), каждая точка которого в плоскости голограммы рассчитывается как результат интерференции волновых фронтов опорной и объектной волн. Для достижения требуемого качества фазовой или амплитудной голограммы важным обстоятельством является сохранение параметров сканирующего пучка – размеров и падения по нормали в плоскости записи во всем диапазоне сканирования.

С этой целью сформулированы условия и получено решение геометрической задачи для моделирования развертывающей оптической системы с расширенной полосой сканирования за счёт сочетания квадратичных форм, выявленные оптические свойства которого обеспечивает увеличение длины растровой строки. Плоскость развертки, в которой

сохраняется параллельный перенос оси сканирующего пучка является решением системы уравнений специального вида.

Рассмотрены модификации способа построчной растровой записи, использующие многострочную развертку, в которой в отличие от image-matrix фрагменты изображения определяются не размерами матрицы транспаранта, а представляют собой полосы, непрерывно сканируемые линейкой индивидуально управляемых излучателей или веером световых пучком. Для формирования последнего могут быть использованы как пассивные модуляторы света, типа LCD-транспаранта, так и матрицы (линейки) активных излучателей, например полупроводниковых лазеров или светодиодов.

По результатам проведенного энергетического расчета оптической системы записи показаны перспективы использования для записи голограмм матричных светодиодных структур и разработанных электронных средств их скоростной коммутации. Так, светодиоды на основе структур GaN имеют светимость  $1\sim 2$  Вт/см<sup>2</sup> при плотности тока 1 кА/см<sup>2</sup>, которая почти на порядок меньше, чем предельно допустимая. Размеры излучающих площадок светодиодов или лазерных диодов могут составлять единицы и десятки микрон. К общим (как для LCD-транспарантов, так и для светодиодных матриц) достоинствам и недостаткам можно отнести то, что с их помощью может быть реализован полутоновой режим записи, а основные потери света в обоих случаях связаны с большой расходимостью пучка на выходе и необходимостью ограничиваться малой входной апертурой оптической системы.

Показаны преимущества image-matrix по сравнению с dot-matrix голограммами, связанные с возможностью получения не только решеток прямых линий, но и произвольных рисунков дифракционных. При этом производительность (время записи) image-matrix-голограмм не зависит от линиатуры. Потенциально оно выше за счет исключения задержек на позиционирование компонентов оптической схемы dot-matrix и записи в пределах каждого экспонируемого фрагмента одновременно нескольких дотов с одновременным сокращением числа шагов, совершаемых при позиционировании 2D-стола. Дополнительное преимущество image-matrix определяется возможностью использования для записи источников некогерентного излучения без высоких требований к монохроматичности, например светодиодов.

Полученные оценки энергетических характеристик:

- указывают на сопоставимость производительности лазерной и светодиодно-матричной технологий при заданной точности и при условии, что используется лазер непрерывного излучения мощностью до 20~30 мВт;

- показывают, что производительность вариантов схем с LCD и DLP транспарантами имеет общий порядок, ограничена в связи с использованием поточечной записи, требующей стартстопного перемещения носителя записи;

- могут служить основой для уточнения стоимости, материальных и временных затрат на реализацию какого-либо из вариантов.

Результаты сравнительного анализа с оптимизацией конструктивной геометрии голографического принтера позволяют сделать вывод о том, что благодаря универсальности

цифрового синтеза с использованием image-matrix и большого значения точечного разрешения (линиатуры) арсенал методов локализованной и распределенной защиты этой технологии частично перекрывает, а частично и дополняет dot-matrix. Голограммы dot-matrix дают больше возможностей для реализации тех же методов защиты с использованием диапазона ультрафиолетовых длин волн, а image-matrix голограммы дают лучшее качество и более широкие возможности для введения защитных элементов в видимом спектре.

#### **Список источников**

- [1] Борискевич, А.А. Голографическая защита информации / А. А. Борискевич, В.К. Ероховец, В.В. Ткаченко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – 280 с.

## **Constructive geometry of image-matrix hologram recording system**

*V. V. Tkachenko, S. L. Kandelinsky*

United Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Structural variants of scanning systems for the formation of image-matrix holograms are considered. A comparison of optical systems, their parameters and elements for the selection of rational design is given.

*Keywords:* Image-matrix hologram, Optical circuit, Scanning recording.

# Разработка наземного стенда лазерного интерферометра для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС

С. С. Донченко, Р. А. Давлатов, Д. А. Соколов, Е.А. Лавров, И.О. Скакун  
ФГУП «ВНИИФТРИ», р.п. Менделеево, Россия

В работе рассмотрены оптические системы существующих проектов космических детекторов гравитационных волн. Описаны принципы построения лазерного межспутникового интерферометра Майкельсона для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС «SOIGA». Представлены результаты разработки наземного стенда интерферометра, оценен шумовой бюджет и подтверждена чувствительность интерферометра на уровне 100 пм. Предложена система углового совмещения оптических осей телескопов с подтвержденной угловой чувствительностью системы на уровне 0,01 угловой секунды.

*Ключевые слова:* Межспутниковый лазерный интерферометр, Гравитационные волны.

*Цитирование:* **Донченко, С. С.** Разработка наземного стенда лазерного интерферометра для проекта космического детектора гравитационных волн на орбитах ГЛОНАСС / С. С. Донченко, Р. А. Давлатов, Д. А. Соколов, Е.А. Лавров, И.О. Скакун // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 219–223.

## Введение

В настоящее время активно развиваются проекты гравитационно-волновых антенн (LISA, TIANQIN, DECIGO и др.). Основные задачи, решаемые в таких проектах – регистрация длинноволновых гравитационных волн и уточнение гравитационного поля Земли с помощью лазерной интерферометрии в космосе. Принцип работы в этих миссиях основан на измерении относительного положения космических аппаратов (КА) и пробных масс, размещенных внутри них.

### 1. Существующие проекты космических детекторов гравитационных

#### ВОЛН

В проекте LISA предлагается разместить КА на гелиоцентрической орбите на расстоянии от 50 до 65 миллионов км от Земли, со средним расстоянием между КА около 2,5 миллиона км. КА в углах треугольника имеют две пробные массы, которые определяют конечные точки плеч, а также оборудование для лазерного интерферометрического измерения длины этих плеч.

В космическом детекторе TIANQIN на каждом космическом аппарате имеются три оптических модуля: модули стабилизации частоты лазера, оптической фазовой синхронизации и гетеродинный интерферометр.

В проекте GRACE-FO группировка состоит из двух низкоорбитальных спутников на высоте от 170 до 200 км, летящих друг за другом. Между космическими аппаратами реализована интерферометрическая измерительная линия.

## 2. Проект гравитационно-волновой антенны SOIGA

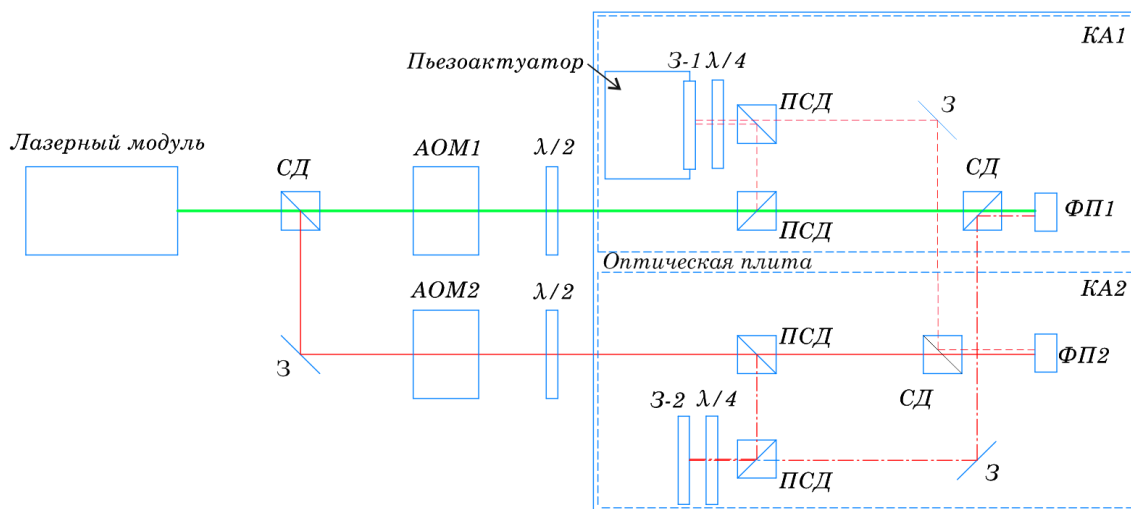
В Российской Федерации предлагается проект космической ГВА на геоцентрической орбите ГЛОНАСС под названием «SOIGA» (Space Optical Interferometric Gravitation Antenna) для регистрации гравитационных волн в диапазоне от  $10^{-2}$  до 1 Гц [1].

В работе [2] было установлено, что оптимальной конфигурацией гравитационно-волновой антенны является кластер из 12 космических аппаратов на высоте орбиты спутников ГЛОНАСС. Космические аппараты размещены в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по долготе восходящего узла на  $120^\circ$ .

В предлагаемом проекте «SOIGA» расстояние между космическими аппаратами составляет от 36 тыс. км до 144 тыс. км, апертура оптической передающей и приемной системы – 200 мм, длина волны – 535 нм.

## 3. Наземный макет интерферометра

Для отработки технических решений по межспутниковому интерферометру был разработан наземный макет интерферометра, функциональная схема которого представлена на рис. 1.



СД – светоделитель, АОМ – акустооптический модулятор,  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка,  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка, З – зеркало, ПСД – поляризационный светоделитель, ФП – фотоприемник

**Рис. 1.** Функциональная схема макета межспутникового интерферометра

На оптической плите имитируются бортовые системы КА1 и КА2, считается, что излучение с частотой  $f_0+f_1$  формируется бортовым лазером первого аппарата, излучение с частотой  $f_0+f_2$  – бортовым лазером второго аппарата. С помощью обычных и поляризационных светоделителей часть излучения подается напрямую на ФП1 и ФП2 с фазой оптического излучения  $\varphi_{on1}$  (рис.1, зеленая сплошная линия) и  $\varphi_{on2}$  (рис.1, красная сплошная линия) соответственно. Пунктирной синей линией показан путь оптического излучения от первого лазера, попадающее на зеркало З-1, выполняющее роль грани пробной массы КА-1,

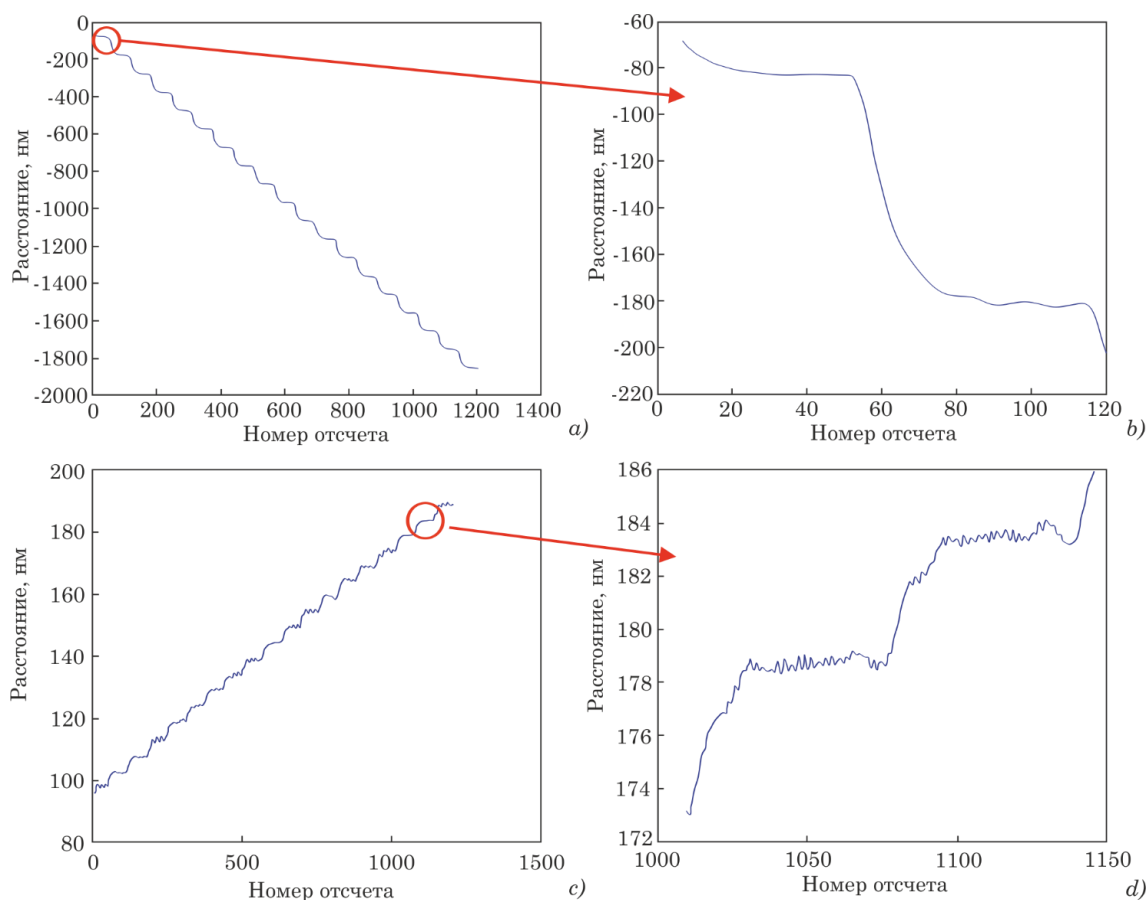
далее отраженное излучение направляется на ФП2 с фазой  $\varphi_{3-1}$ . Штрихпунктирной линией показан путь оптического излучения от первого лазера, попадающее на зеркало 3-2, выполняющее роль грани пробной массы КА-2, далее отраженное излучение направляется на ФП1 с фазой  $\varphi_{3-2}$ . Таким образом на ФП1 и ФП2 формируются разностные электрические сигналы с частотой  $f_1 - f_2$  и фазой  $\varphi_{on1} - \varphi_{3-2}$  и  $\varphi_{on2} - \varphi_{3-1}$  соответственно.

Сигналы с ФП1 и ФП2 подаются на цифровой осциллограф, который регистрирует сигнал биений. Далее с помощью Фурье-метода измеряются фазы сигнала с фотоприемников и вычисляется разность  $\varphi_1 - \varphi_2$  для ФП1 и ФП2 соответственно. Приращение расстояния  $\Delta L$  между зеркалами 3-1 и 3-2 соответственно можно рассчитать из соотношения:

$$\Delta L = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)\lambda}{4\pi}$$

где  $\lambda$  – длина волны оптического излучения.

Для проверки разрешающей способности макета интерферометра использовался пьезоактуатор, на котором размещается зеркало 3-1. На пьезоактуаторе устанавливается режим сканирования, при котором с заданной периодичностью зеркало перемещается на указанное расстояние с дискретностью перемещения 1 нм. Результаты сканирования с шагом 5 и 100 нм приведены на рис.2.



**Рис.2.** Результаты исследования линейного разрешения на макете интерферометра

Было показано, что измеренное с помощью макета интерферометра перемещение зеркала 3-1 относительно 3-2 с шагом в 5 и 100 нм соответствует данным энкодера пьезоактуатора со средней разницей в 0,5 нм и СКО измерений 0,17 нм.

На рисунке 3 показана угловая разрешающая способность системы.

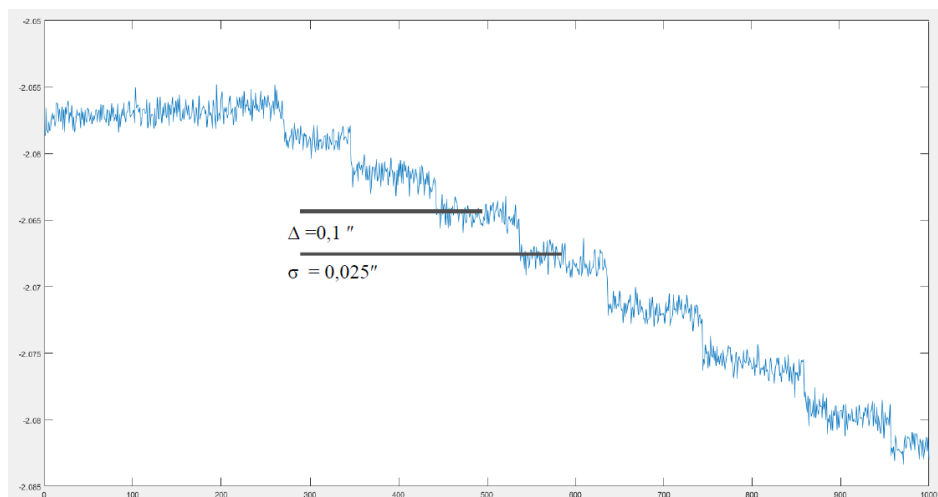


Рис.3. Результаты исследования угловой разрешающей способности на макете интерферометра

### Заключение

В работе представлен проект отечественной гравитационно-волновой антенны «SOIGA». Предложен и разработан наземный макет межспутникового интерферометра. Показана точность измерений приращений расстояния между зеркалами на уровне  $\pm 0,5$  нм с СКО 0,17 нм. Предложена система углового совмещения оптических осей телескопов с подтвержденной угловой чувствительностью системы на уровне 0,01 угловой секунды.

### Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022\20.

### Список источников

- [1] **Пустовойт, В. И.** Концепция создания космической лазерной гравитационной антенны на геоцентрической орбите ГЛОНАСС «SOIGA» / В. И. Пустовойт, С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Ф. Фатеев // Альманах современной метрологии — 2020. — № 1 (21). — С. 27–49.
- [2] **Донченко, С. С.** Особенности высокоточной космической лазерной гравитационно-волновой антенны на основе спутников, движущихся по орбитам ГЛОНАСС / С. С. Донченко, В. Ф. Фатеев., Р. А. Давлатов., П. Г. Харламов., Е. А. Карауш., Ю. В. Гостев., Д. А. Соколов., Е. А. Лавров // Альманах современной метрологии — 2020. — № 3 (23) — С. 53-96.

# **Development of a ground model of a laser interferometer for the space gravitational wave detector project of in GLONASS orbits**

*S. S. Donchenko, R. A. Davlatov, D. A. Sokolov, E. A. Lavrov, I. O. Skakun*

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Russia

The paper considers the optical systems of existing projects of space gravitational wave detectors. The principles of constructing an inter-satellite Michelson laser interferometer are described for the space gravitational wave detector project "SOIGA" in GLONASS orbits. The results of the engineering of a ground model of an interferometer are presented, the noise budget is evaluated, and the sensitivity of the interferometer at a level of 100 pm is affirmed. A system of angular alignment of the optical axes of telescopes with a confirmed angular sensitivity of the system at the level of 0.01 arc seconds is provided.

*Keywords:* Intersatellite laser interferometer, Gravitational waves.



# Интерферометр Тваймана-Грина с применением метода фазовых шагов

*И. Ю. Фандиенко, Р. В. Минаев, Д. Б. Охрименко*

ООО «Электростекло»

Доклад посвящён современным методам измерения параметров поверхностей оптических изделий. Представлен разработанный интерферометр, построенный по схеме Тваймана-Грина с применением метода фазовых шагов. Интерферометр предполагается использовать для контроля асферических поверхностей крупногабаритных оптических изделий. Использование интерферометра по схеме Тваймана-Грина с использованием метода фазовых шагов позволяет существенно повысить точность и воспроизводимость измерений параметров поверхностей оптических изделий. В докладе представлены конструкция интерферометра, алгоритм работы, а также особенности юстировки.

*Ключевые слова:* Интерферометр, Схема Тваймана-Грина, Метод Фазовых шагов, Средства измерений, Интерференция.

*Цитирование:* Фандиенко, И. Ю. Интерферометр Тваймана-Грина с применением метода фазовых шагов / И. Ю. Фандиенко, Р. В. Минаев, Д. Б. Охрименко // HOLOEXPO 2022:

XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 224–225.

## Введение

В условиях современного производства наилучшим методом контроля асферических поверхностей крупногабаритных оптических изделий является интерференционный метод, для которого используется интерферометр. Интерферометр — измерительный прибор, действие которого основано на явлении интерференции.

Нами был разработан интерферометр ПИК-ПАС согласно ГОСТ Р 8.743-2011, основанный на схеме Тваймана-Грина. Главными достоинствами разработанного прибора являются малые габариты, простота юстировки и возможность его модификации. В интерферометре ПИК-ПАС используется HE-NE лазер с рабочей длиной волны 632,8 нм, точность измерений при этом достигает  $\lambda/100$ .

Данная точность может быть не достаточной для ряда задач в следствии чего перед нами была поставлена задача достичь точности  $\lambda/500$ . Одним из способов достижения поставленной задачи является применение метода фазовых шагов [3].

Названный метод первоначально был предложен для автоматизации интерференционных измерений и позволил не только повысить информационную емкость измерений, но, в ряде случаев, и повысить их точность. Достоинствами метода являются его сравнительная простота и возможность полной автоматизации процесса расшифровки интерферограмм. В данном методе регистрируют несколько интерферограмм с внесением фазового сдвига между экспозициями интерферограмм [1]. В этом случае интерференционный сигнал описывается системой уравнений

$$I_j = A \cdot [1 + V \cdot \cos(\Phi + \Delta\varphi_j)]$$

где  $\Delta\varphi_j$  - вносимый фазовый сдвиг,  $j \in (0..N)$  [2].

Процесс измерения полностью автоматизирован и занимает доли секунды (время, необходимое для ввода нескольких кадров). Ступенчатое изменение фазы опорного волнового поля в заданной последовательности можно проводить смещением зеркала, прикрепленного к пьезокерамическому элементу, управляемому компьютером.

Интерферометр ПИК-ПАС был модифицирован с целью применения метода фазовых шагов, путем внесения в конструкцию пьезоэлемента и использования высокоточной телескопической системы.

### Заключение

Модификация интерферометра на основе схемы Тваймана Грина с применением метода фазовых шагов позволили существенно повысить точность, а также воспроизводимость измерений.

### Список источников

- [1] **Гужов, В.И.** Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии / В.И.Гужов, С.П. Ильиных, Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С // Автоматика и программная инженерия. — 2013 — №1 — С.10–15.
- [2] **Ильиных, С.П.** Траекторный анализ интерферограмм в методе фазовых шагов. Новые возможности / С.П. Ильиных // Автоматика и программная инженерия. — 2012 — №2 — С.9–22.
- [3] **Вишняков, Г.Н.** Сдвиговая спекл-интерферометрия с использованием метода фазовых шагов / Г. Н. Вишняков, А. Д. Иванов, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев // Квантовая электроника — 2020 — С.636–642.

## Twyman-Green interferometer using the phase step method

*I. Y. Fandienko, R. V. Minaev, D. B. Okhrimenko*

Elektrosteklo, Moscow, Russia

The report is devoted to modern methods for measuring the parameters of the surfaces of optical products. The developed interferometer built according to the Twyman-Green scheme using the phase step method is presented. The interferometer is supposed to be used to test aspherical surfaces of large optical products. The use of an interferometer according to the Twyman-Green scheme using the phase step method makes it possible to significantly improve the accuracy and reproducibility of measurements of the parameters of the surfaces of optical products. The report presents the design of the interferometer, the algorithm of operation, as well as the adjustment features.

*Keywords:* Interferometer, Twyman-Green scheme, Phase step method, Measuring instruments, Interference.

# Интерферометр для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ

*Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев*

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

В результате работ по усовершенствованию Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 была создана эталонная установка для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ. В докладе представлены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики эталонной установки, основу которой составляет цифровой интерферометр для измерения двумерного пространственного распределения (профиля) тонких срезов заготовок градиентных стекловолокон.

*Ключевые слова:* Государственный первичный эталон, стекловолокно, профиль показателя преломления, цифровой интерферометр.

*Цитирование:* Вишняков, Г. Н. Интерферометр для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы показателя преломления твердых веществ / Г. Н. Вишняков, В. Л. Минаев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 226–232.

## Введение

Измерения пространственного распределения (профиля) показателя преломления (ПП) обусловлено актуальностью таких измерений во многих областях науки и техники. Так, например, качество микрооптических устройств сильно зависит от правильного трехмерного распределения ПП внутри их объема. Такие устройства используются, например, в оптических сетях, микроэлектромеханических системах (MEMS), микролазерах. Особенно это важно для микроэлементов с модифицированным комплексным распределением ПП, к которым относятся оптические волокна, волноводы, линзы с градиентным показателем преломления и т.д.

Наиболее остро проблема измерения профиля ПП стоит при контроле качества изготовления оптического стекловолокна. Это связано с бурным развитием волоконно-оптических систем связи, а также с тем, что максимальная полоса пропускания волоконного световода достигается оптимизацией распределения ПП по сердцевине волокна.

Важное измерение при производстве оптического волокна — это определение профиля ПП заготовки, из которой вытягивается волокно. Информация о профиле ПП используется для прогнозирования характеристик волокна, которое в конечном итоге получается из заготовки, и для предоставления информации о размерах, которая необходима для управления окончательными процессами изготовления заготовки. Измерение профиля ПП

также периодически используется уже для вытянутых волокон, чтобы гарантировать, что процесс вытягивания существенно не изменил световодные свойства, предсказанные из анализа заготовки.

Измерения профиля ПП обычно выполняют на цилиндрических заготовках-преформах, поскольку форма профиля ПП после перетяжки в световод сохраняется с точностью до 0,1 %. Приборы для контроля профиля ПП оптических волокон являются неотъемлемой частью технологических линий по их производству. Профиль ПП определяет геометрические, волноводные и дисперсионные параметры световодов [1]. Чтобы эти параметры соответствовали международным коммерческим стандартам, профиль ПП необходимо контролировать с точностью от 5 до 10%.

В связи с этим к настоящему времени разработано большое количество разрушающих и неразрушающих методов измерения профиля ПП оптических волокон и их заготовок [2, 3]. Появились соответствующие средства измерений – оптические анализаторы заготовок волокна, например, приборы серии P-102 (York-Technology, США), P104 Preform Analyzer (Photon Kinetics, США). Есть также отечественные аналоги, так во Всесоюзном научно-исследовательском институте технической физики (РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск) разработана модель контрольно-измерительного прибора ИПП-1 для измерения профиля ПП заготовок [4].

После появления средств измерений профиля ПП встала необходимость метрологического обеспечения такого рода измерений. Так, например, в Национальной физической лаборатории (NPL, Англия), созданы два вида стандартных образцов волокна со ступенчатым профилем показателя преломления для калибровки анализаторов заготовок.

Поэтому в период с 2018 по 2020 год во ФГУП «ВНИИОФИ» была проведена модернизация эталона ГЭТ 138 в части обеспечения воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения единицы ПП в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,55 мкм. Результаты модернизации эталона ГЭТ 138 в части обеспечения воспроизведения, хранения и передачи единицы ПП твердых и жидких веществ на разных длинах волн из диапазона от 0,4 до 1,55 мкм были представлены в нашей предыдущей работе [5].

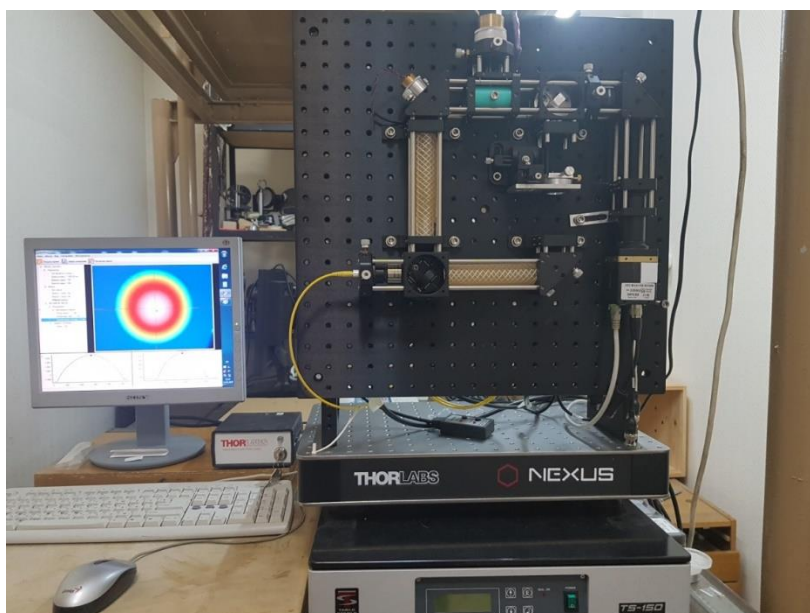
### **Описание цифрового интерферометра**

Для воспроизведения, хранения и передачи двумерного пространственного распределения (профиля) единицы ПП твердых веществ в состав усовершенствованного ГЭТ 138-2021 вошел цифровой интерферометр со специализированным программным обеспечением WinPhast.

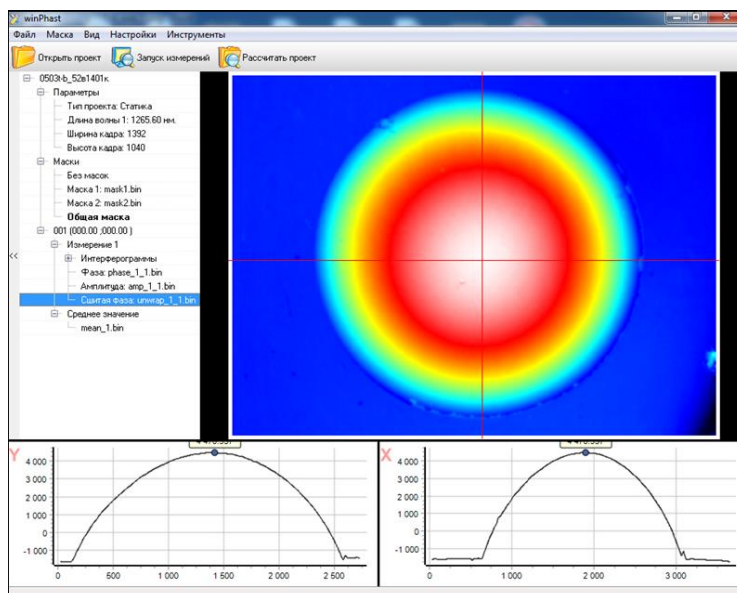
Основой эталонной установки служит цифровой интерферометр, собранный по схеме двухканального интерферометра Маха-Цандера (рис. 1). Для получения фазовых изображений объекта в нем реализован метод дискретного фазового сдвига при помощи управляемого от компьютера опорного зеркала, закрепленного на пьезоэлементе. Интерферограммы, получаемые при различных положениях зеркала, с помощью встроенной цифровой видеокамеры поступают в персональный компьютер, где производится их автоматическая обработка, в результате которой восстанавливается двумерное

распределение оптической разности хода. Зная толщину объекта по измеренной разности хода вычисляется двумерное пространственное распределение (профиль) ПП материала, из которого изготовлен объект.

В качестве материального носителя единицы двумерного пространственного распределения (профиля) ПП используется тонкий срез (толщиной около 100 мкм) заготовки градиентного волокна, которая представляет собой стеклянный цилиндр. Заготовка имеет нелинейный градиент показателя преломления от оси цилиндра к его боковой поверхности. Тонкий срез представляет собой диск с плоскопараллельными и полированными плоскостями. Для уменьшения относительного фазового набега исследуемый объект должен быть помещен в иммерсионную жидкость с показателем преломления близким по значению к ПП на боковой поверхности заготовки волокна. Результаты измерений в виде двумерного распределения ПП и графиков сечений отображаются на экране компьютера (рис. 2). Для управления вводом изображений, сдвигом пьезоэлемента и расшифровкой интерферограмм используется разработанное специализированное программное обеспечение WinPhast.



**Рис. 1.** Фотография цифрового интерферометра



**Рис. 2.** Восстановленная двумерная карта оптической разности хода излучения внутри тонкого среза заготовки градиентного волокна

В цифровом интерферометре измеряется разность оптических длин пути  $\Delta(x, y)$  излучения вдоль лучей, проходящих через срез и через иммерсионную жидкость. Искомое двумерное пространственное распределение (профиль) ПП вычисляется по следующей формуле (уравнение измерений):

$$n(x, y) = \frac{\Delta(x, y)}{d} + n_{им}, \quad (1)$$

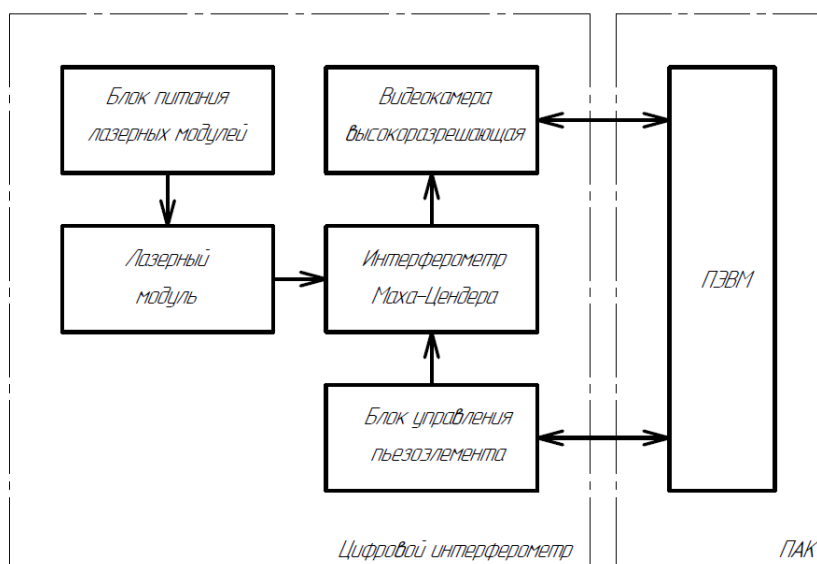
где  $d$  — толщина среза,  $n_{им}$  — показатель преломления иммерсионной жидкости.

Функциональная схема цифрового интерферометра состоит из следующих блоков (рис. 3):

1 Цифровой интерферометр, включающий в себя:

- интерферометр Маха-Цандера;
- высокоразрешающую видеокамеру;
- лазерный модуль;
- блок питания лазерного модуля;
- блок управления пьезоэлемента.

2 Программно-аппаратный комплекс (ПАК) на основе ПЭВМ со специализированным программным обеспечением WinPhast.



**Рис. 3.** Функциональная схема цифрового интерферометра

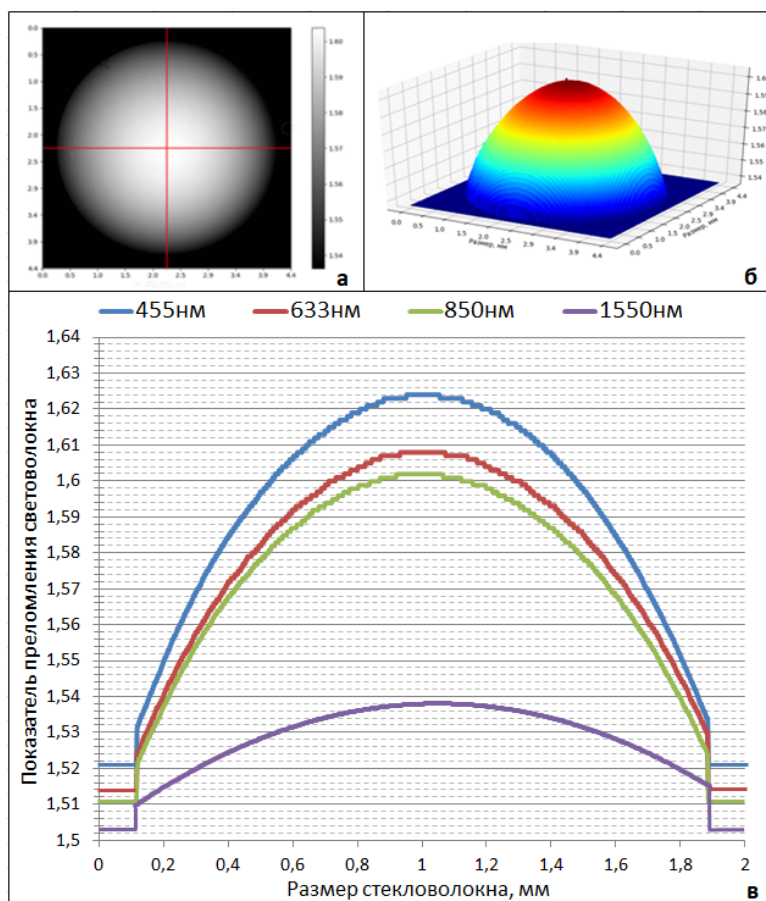
### Экспериментальные результаты

Исследование метрологических характеристик Государственного первичного эталона ГЭТ 138-2021 в части воспроизведения двумерного пространственного распределения (профиля) единицы ПП проводилось путем измерения на цифровом интерферометре двумерного профиля ПП эталонной меры, выполненной в виде тонкого среза заготовки градиентного волокна. Измеренный профиль ПП тонкого среза приписывается самой заготовке градиентного волокна, которая далее используется в качестве эталонной меры пространственного распределения ПП.

На цифровом интерферометре были проведены измерения пространственного распределения ПП тонкого среза толщиной 110 мкм заготовки градиентного волокна, изготовленного в Лаборатории специального стекла ООО НТО «ИРЭ-Полюс» (МО, г. Фрязино).

Тонкий срез стекловолокна был размещен между двух стеклянных пластин толщиной 1 мм, разделенных спейсером толщиной около 0,1 мм. Пространство между стеклянными пластинами было заполнено маслом иммерсионным для микроскопии в соответствии с ГОСТ 13739-78. ПП иммерсионного масла был предварительно измерен на рефрактометре Atago RX-9000α (Atago, Япония), а также на гониометре-спектрометре, входящем в состав ГЭТ 138-2021, с помощью полой призмы на различных длинах волн. Так, на длине волны излучения 633 нм, ПП масла составил 1,514126. В качестве исходной измеряемой величины была получена двумерная карта оптической разности хода (рис. 2).

Было проведено 10 измерений, на основании которых по формуле (1) производился расчет двумерного профиля ПП тонкого среза заготовки градиентного волокна на сетке 128×128 отсчетов для длины волны излучения 633 нм. Аналогичные измерения этого же среза с последующим расчетом двумерного профиля ПП были проведены на других длинах волн излучения 455, 850 и 1550 нм (рис. 4). Результаты исследования показывают, что с увеличением длины волны значение ПП в максимуме профиля уменьшается.



**Рис. 4.** Результаты измерений тонкого среза заготовки градиентного волокна: (а) полутоновое изображение двумерного распределения ПП на длине волны 633 нм, (б) аксонометрическое псевдоцветное изображение двумерного распределения ПП на длине волны 633 нм, (в) профили ПП на длинах волн 455, 633, 850 и 1550 нм

Измерение зависимости двумерного распределения ПП от длины волны излучения очень важно в оптическом производстве. Такие критические показатели характеристик волокна, как дисперсия и модальная эффективная площадь, можно наиболее точно предсказать, зная спектральную зависимость профиля ПП волокна. Поскольку большинство оптоволокон легированы сложной запатентованной смесью с несколькими видами добавок, которые могут оказывать неаддитивное влияние на показатель преломления самого волокна, в качестве производственного контроля может быть применяться метод анализа спектральной зависимости ПП волокна [6].

Исходя из уравнения измерений (1) вклад в расширенную неопределенность воспроизведения двумерного пространственного распределения единицы ПП вносят неопределенности измерений следующих величин:

- двумерной карты оптической разности хода  $\Delta(x, y)$  в мкм;
- показателя преломления иммерсионной жидкости  $n_{им}$ ;
- толщины среза  $d$  в мкм.

Проведенный расчет бюджета неопределенности показал, что расширенная неопределенность при коэффициенте охвата 2 не превышает  $5,0 \cdot 10^{-4}$  для диапазона длин волн от 0,44 до 0,7 мкм и не превышает величины  $4,4 \cdot 10^{-4}$  для диапазона от 0,7 до 1,55 мкм.



## Заключение

В соответствии с приказом Минпромторга России № 232 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений показателя преломления» от 01.02.2022. Государственный первичный эталон ГЭТ 138-2021 возглавляет Государственную поверочную схему. Наряду с другими единицами ГЭТ 138-2021 воспроизводит, хранит и передает двумерное пространственное распределение (профиль) единицы ПП рабочим эталонам 1-го разряда в виде эталонных мер профиля ПП и далее средствам измерения в виде анализаторов заготовок и самого стекловолокна. Модернизация Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 позволяет обеспечить единство измерений профиля ПП заготовок и самих оптических волокон, что важно для оптической промышленности и волоконно-оптических систем связи.

## Список источников

- [1] Гауэр, Д. Волоконно-оптические линии связи. М.: Радио и связь, 1992. 100 с.
- [2] Marcuse, D. Principles of Optical Fiber Measurement. New York: Academic Press. ch. 4. 1981. 360 p.
- [3] Philen D.L. Measurement and Characterization of Optical Fibers. In: Lin, C. (eds) Optoelectronic Technology and Lightwave Communications Systems. Springer, Dordrecht, 1989, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-7035-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-011-7035-2_2).
- [4] Афанасьев, А.Н. Измеритель профиля показателя преломления показателя преломления оптических кварцевых заготовок / А.Н. Афанасьев, А.Ф. Иванов, В.И. Махров, А.А. Шибаяев, Л.А. Мялицин, Н.Н. Платонов // Известия Челябинского научного центра. - 2003. - №4. - С. 15-19.
- [5] Вишняков, Г.Н. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 / В.Л. Минаев, С.С. Бочкарева // Измерительная техника - 2022. - №5. - С. 4-9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-4-9>.
- [6] Yablou A.D. Multiwavelength optical fiber refractive index profiling // Proc. SPIE. - 2010. - Vol. 7580. - P. 758015.

## Interferometer for reproducing, storing and transmitting a two-dimensional spatial distribution (profile) of a unit of refractive index of solids

*G. Vishnyakov, V. Minaev*

FGUP «VNIIOFI», Moscow, Russia

As a result of work on the improvement of the State Primary Standard of the unit of refractive index GET 138-2021, a reference setup was created for reproducing, storing and transmitting a two-dimensional spatial distribution (profile) of a unit of refractive index of solids. The report presents the composition, principle of operation and main metrological characteristics of the reference setup, which is based on a digital interferometer for measuring the two-dimensional spatial distribution (profile) of thin sections of preform of glass fibers.

*Keywords:* State primary standard, Glass fiber, Refractive index profile, Digital interferometer.

# Методы измерений показателя преломления оптических сред: преимущества и недостатки

А. В. Лукин<sup>1</sup>, А. Н. Мельников<sup>1</sup>, А. Н. Чеплаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В докладе приведен обзор известных методов измерений и соответствующей измерительной аппаратуры показателя преломления оптических материалов, выполненный в целях выявления наиболее универсального метода, сочетающего наибольший рабочий оптический спектральный диапазон и наименьшие требования к обработке поверхностей и форме исследуемого образца.

*Ключевые слова:* Показатель преломления оптических сред, Методы измерений, Измерительное оборудование, Доступные диапазоны измерений, Погрешность измерений.

*Цитирование:* Лукин, А. В. Методы измерений показателя преломления оптических сред: преимущества и недостатки / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Н. Чеплаков // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 233–238.

Как известно, параметры оптических материалов влияют на качество изображения, формируемого оптической системой. И при фактическом отклонении какого-либо параметра от его расчетного значения, которое использовалось при проектировании оптических деталей или системы, качество изображения будет изменяться. В настоящей работе рассматривается один из ключевых параметров оптических материалов — показатель преломления [1], приводится обзор и сравнение известных методов измерений и соответствующей измерительной аппаратуры.

Под показателем преломления  $n$  оптического материала понимают отношение синуса угла падающего луча  $\varepsilon$  к синусу угла преломления луча  $\varepsilon'$ , или отношение фазовой скорости света в воздухе  $v_v$  и скорости света в веществе  $v_c$ .

$$n = \sin\varepsilon/\sin\varepsilon' = v_v/v_c.$$

Для измерения показателя преломления оптического стекла согласно ГОСТ 28869–90 принято использовать следующие методы [2]:

- гониометрические методы:
  - метод наименьшего отклонения;
  - метод автоколлимации;
- рефрактометрические методы:
  - метод измерения на рефрактометре Пульфриха;
  - метод измерения на V-рефрактометре;
  - метод измерения на рефрактометре Аббе;
  - метод измерения на компенсационном рефрактометре;

интерференционный сравнительный метод измерения (метод Обреимова).

В таблице 1 представлено сравнение методов измерения показателя преломления, по ГОСТ 28869–90.

Из таблицы 1 видно, что все методы измерений показателя преломления имеют высокие требования к образцам измерения. Для гониометрических методов требуется образец в виде трёхгранной равнобедренной призмы, а для большинства рефрактометрических методов — в виде плоскопараллельной пластины или прямоугольного параллелепипеда.

Самым точным методом измерения является метод автоколлимации, который позволяет проводить измерения в широком оптическом спектральном диапазоне от 400 до 12000 нм с погрешностью  $\pm 6 \times 10^{-6}$ , но при этом очень высоки требования к качеству обработки граней и к самой форме исследуемого образца. Поэтому метод автоколлимации применим для контроля показателей преломления оптического материала, предназначенного для изготовления элементов приборов высокого оптического разрешения. В то время как интерференционный метод (метод Обреимова) с рабочим оптическим спектральным диапазоном от 400 до 700 нм и погрешностью  $\pm 5 \times 10^{-4}$  предполагает использование исследуемого образца с пониженными требованиями к качеству обработки поверхностей его граней. В связи с этим метод Обреимова пригоден лишь для контроля показателей преломления оптического материала для получения оптических элементов фотометрических приборов.

Следует отметить, что ГОСТ 28869–90 регламентирует группу классических методов измерений показателя преломления оптических сред, требующих высокое качество материала, определенную форму и размер образца и высокое качество их полированных поверхностей, в то время как некоторые методы и средства измерения рассматриваемого оптического параметра в него не попали. Далее остановимся на рассмотрении новых методов и устройств измерений показателя преломления, выявленных в результате патентного поиска и анализа литературы, посвященной оптике. Патентный поиск проведен по международному патентному классификатору G01N 21/41.

В таблице 2 представлены пять наиболее интересных методов измерений показателя преломления, дано их описание и особенности условий реализации измерений.

Как видно из таблицы 2, описанные способы и устройства сильно отличаются от представленных в ГОСТ 28869–90 и позволяют измерять показатель преломления образцов не только в форме трехгранной равнобедренной или прямоугольной призмы, но и в виде порошка или тонкой пленки. Также появились способы расчета показателя преломления на основе результатов измерения диаграммы интенсивности теплового излучения, угла полного внутреннего отражения с учетом значения производной коэффициента отражения по углу в локальной области измерения.

Таблица 1. Методы измерений согласно ГОСТ 28869–90

Наименование метода измерения	Используемая аппаратура	Спектральный диапазон измерений, нм	Погрешность измерения	Особенности исследуемого образца
Гониометрические методы				
Метод наименьшего отклонения	Гониометр или гониометр-спектрометр	400 – 700	$\pm 1 \times 10^{-5}$	Образец должен иметь форму трехгранной равнобедренной призмы с размерами не менее 30×20 мм и отполированные поверхности без царапин, точек, налётов, пятен, плёнок
Метод автоколлимации	Гониометр или гониометр-спектрометр	400 – 12000	$\pm 6 \times 10^{-6}$	Образец должен иметь форму трехгранной равнобедренной призмы с размерами не менее 30×50 мм и отполированные поверхности без царапин, точек, налётов, пятен, плёнок. На поверхности рабочей отражающей грани образца должно быть нанесено зеркальное покрытие, обеспечивающее спектральный коэффициент отражения не менее 0,90
Рефрактометрические методы				
Метод измерения на рефрактометре Пульфриха	Рефрактометр Пульфриха	400 – 700	$\pm 1 \times 10^{-4}$	Образец должен иметь форму прямоугольной пластины с размерами не менее 15×15×4 мм и отполированные поверхности
Метод измерения на V-рефрактометре	V-рефрактометр	440 – 660	$\pm 5 \times 10^{-5}$	Образец должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда со стороной сечения не менее 17 мм и отполированные или отшлифованные поверхности
Метод измерения на рефрактометре Аббе	Рефрактометр Аббе	546 или 589	$\pm 2 \times 10^{-4}$	Образец должен иметь форму плоскопараллельной пластины с полированными поверхностями.
Метод измерения на компенсационном рефрактометре	Компенсационный рефрактометр	480 – 660	$\pm 1 \times 10^{-5}$	Измеряемый образец должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда размерами не менее 10×10×10 мм. Контрольный образец должен иметь прямоугольную форму размерами не менее 20×10×10 мм. Сравнимые образцы должны быть отшлифованы и склеены между собой наибольшими гранями
Интерференционный сравнительный метод измерения (метод Обреимова)	Монохроматор	400 – 700	$\pm 5 \times 10^{-4}$	Измеряемый и контрольный образцы могут иметь любую форму, рабочие грани должны иметь ширину от 0,5 до 3,0 мм, в 2 мм от края рабочей грани не должно быть свилей, видимых невооруженным глазом

Таблица 2. Анализ результатов патентно-информационного поиска

Наименование метода измерения	Используемая аппаратура	Спектральный диапазон измерений, нм	Погрешность измерения	Особенности исследуемого образца	Ссылка
Способ определения показателя преломления оптически прозрачного материала	Лазер	400 – 700	$\sim \pm 0,05$	Исследуемый образец должен быть предварительно измельчен до нано- или ультрадисперсного порошка и спрессован.	[3]
Способ измерения показателя преломления и устройство для его осуществления (модифицированный метод измерения на рефрактометре Аббе)	Измерительная установка – модифицированный рефрактометр Аббе	400 – 700	$\sim \text{до } \pm 2 \times 10^{-4}$	Для измерения показателя преломления исследуемой среды на границе с оптически прозрачным твердым телом требуется на заданную грань испытуемого образца нанести одномерный фотонный кристалл (твердое тело) с известными толщинами слоев и их показателями преломления.	[4]
Способ измерения показателей преломления оптических материалов в твердом состоянии или в виде расплава	Спектроанализатор	550 – 620	$\sim \pm 0,01$	Образец исследуемого материала нагревают до температуры, позволяющей регистрировать его тепловое излучение.	[5]
Лазерный триангуляционно-интерферометрический метод	Лазерное триангуляционно-интерферометрическое измерительное устройство	400 – 700	$\sim \pm 5 \times 10^{-6}$	Образец должен представлять собой прозрачную для оптического диапазона излучения ткань или пленку на прозрачных и непрозрачных подложках. Диапазоны измерений толщины от 0,01 мм до 20 мм; показателя преломления от 1 до 2 и локального радиуса кривизны поверхности от 6 мм и более.	[6]
Интерферометрический метод	Интерферометр	157 – 12000	$\pm 5 \times 10^{-6}$	Образец должен иметь форму плоскопараллельной пластины с полированными поверхностями и известной толщиной. Контрольный образец должен быть с известной толщиной и показателем преломления.	[7]

Найденные в процессе патентного поиска и анализа технической литературы решения выходят за рамки рефрактометрических и гониометрических методов и позволяют измерять показатель преломления оптических сред, не требуя использования многокомпонентных оптических схем и высокого качества материала исследуемого образца. Это приводит к повышению гибкости процесса измерений и многократному упрощению методики измерения показателя преломления.

На основе углубленного анализа материалов патентно-информационного поиска и технической литературы сделан вывод о целесообразности формирования технических требований на разработку рефрактометра, основанных на новых физических принципах. В частности, представляет интерес рассмотрение возможности реализации аналитической связи между коэффициентами преломления, отражения, углами падения и другими параметрами электромагнитного излучения, представленными в обобщенных формулах Френеля, в том числе с учетом угла Брюстера. Важно при этом предусмотреть поиск путей повышения точности измерений путем создания специальных программных средств, позволяющих учесть влияние дефектов отражающей поверхности исследуемого образца.

#### Список источников

- [1] **Афанасьев, В. А.** Оптические измерения: Учебник для вузов / В. А. Афанасьев. — М.: Высшая школа, 1981. — 229 с.
- [2] **ГОСТ 28869–90** Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. — 18 с.
- [3] **Патент № 2629695 РФ.** Способ определения показателя преломления оптически прозрачного материала / Л. А. Акашев, Н. А. Попов, В. Г. Шевченко, Б. Д. Антонов, В. А. Кочедыков. — Заяв. 24.02.2016. — Оpubл. 31.08.2017.
- [4] **Патент № 2442142 РФ.** Способ измерения показателя преломления и устройство для его осуществления / В. Н. Конопский. — Заяв. 27.08.2009. — Оpubл. 10.02.2012.
- [5] **Патент № 2733391 РФ.** Способ измерения показателей преломления оптических материалов в твердом состоянии или в виде расплава / Г. А. Буфетова, С. Я. Русанов, В. Ф. Серегин, В. В. Кашин, В. Б. Цветков. — Заяв. 19.04.2020. — Оpubл. 01.10.2020.
- [6] **Патент № 191566 РФ.** Лазерный триангуляционно-интерферометрический измерительный комплекс оптических характеристик прозрачных биологических тканей и плёнок / А. А. Адамов, М. С. Баранов, В. Н. Храмов. — Заяв. 07.03.2019. — Оpubл. 24.02.2016.
- [7] **Коломийцев, Ю. В.** Интерферометры. Основы инженерной теории, применение / Ю. В. Коломийцев. — Л.: Машиностроение, 1976. — 296 с.

# Methods for measuring the refractive index of optical materials: advantages and disadvantages

*A. V. Lukin<sup>1</sup>, A. N. Melnikov<sup>1</sup>, A. N. Cheplakov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

The report provides a review of known measurement methods and related measurement equipment for the refractive index of optical materials, carried out in order to identify the most universal method that combines the largest working optical spectral range and the smallest requirements for surface treatment and the shape of the test sample.

*Keywords:* Refractive index of optical materials, Measurement methods, Measuring equipment, Available measuring ranges, Measurement error.

# Исследование когерентных и поляризационных характеристик рассеянного лазерного излучения при контроле качества поверхностей оптических деталей

*Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик*

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Проанализированы результаты теоретических исследований, посвящённых изучению когерентных и поляризационных свойств источников оптического излучения. Рассмотрены понятия временной и пространственной когерентности квазимонохроматического источника излучения, а также понятия площади и объёма квантово-механической ячейки в некоторой области пространства для определённого источника оптического излучения. Для анализируемого объёма когерентности рассмотрено среднее число фотонов в определённом спиновом состоянии, определяющее в квантовой статистике параметр вырождения лазерного излучения (электромагнитного поля).

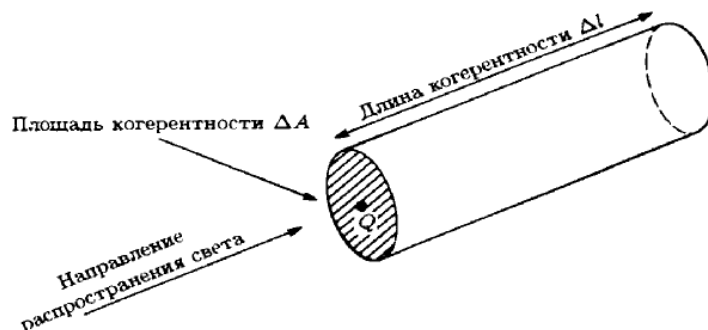
*Ключевые слова:* Временная когерентность, пространственная когерентность, параметр вырождения лазерного излучения, поляризация лазерного излучения.

*Цитирование:* Денисов, Д. Г. Исследование когерентных и поляризационных характеристик рассеянного лазерного излучения при контроле качества поверхностей оптических деталей / Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 239–241.

Как известно все источники оптического излучения характеризуются не только определёнными пространственно-угловыми характеристиками, но спектральными и когерентными свойствами [1,2] (см. рис.1). Так, например, при рассмотрении физических процессов интерференции важными являются проявления временной когерентности между двумя пучками, поскольку формируемый контраст интерферограмм зависит от времени задержки между этими пучками. В свою очередь произведение времени задержки на ширину полосы спектральной линии источника излучения должно быть менее единицы, что в свою очередь определяет время и длину когерентности источника излучения. При суперпозиции как минимум двух пучков оптического излучения с учётом фазовых соотношений, между ними определяющим образом влияет пространственная когерентность, характеризующая расстояние между двумя осциллирующими источниками (вторичными). Результат суперпозиции наблюдается в некоторой плоскости локализации интерференционных полос, удалённой от вторичных источников на определённом расстоянии. Площадь анализируемой плоскости локализации называют площадью когерентности оптического излучения, а квадратный корень из данной величины определяет поперечную длину когерентности. Допуская, что электромагнитное поле представляет собой плоскую квазимонохроматическую, линейно поляризованную волну, можно показать, что прямой цилиндр, основанием которого является площадь когерентности, высотой равной



продольной когерентности определяет объём когерентности некоторой квантово-механической ячейки в пространстве. В данном объёме может содержаться определённое количество фотонов (рис 1.).



**Рис. 1.** К определению объёма когерентности и степени вырождения оптического излучения

В объёме представленной квантово-механической ячейки содержание среднего числа фотонов в определённом спиновом состоянии определяет параметр вырождения. На языке квантовой статистики параметр вырождения представляет собой среднее число фотонов, находящихся в одинаковом квантовом состоянии [2]. Дальнейшие теоретические исследования дают основания предполагать о том, что именно параметр вырождения является первичным в определении когерентных свойств оптического и в частности лазерного излучения с точки зрения количества содержания фотонов в анализируемой квантово-механической ячейке. Важно отметить, что параметр вырождения определяющим образом будет влиять на пространственную когерентность лазерного излучения при его взаимодействии с объектом (предметом), имеющим неоднородный профиль поверхности, а значит определять условия формирования пространственной спекл-структуры. Последняя, в свою очередь в значительной степени влияет как на распределение интенсивности среднего значения, так и на контраст регистрируемого видеоизображения в оптико-электронных приборах контроля параметров качества оптических изделий.

### Список источников

- [1] Ларкин А.И. Когерентная фотоника/А.И.Ларкин, Ф.Т.С.Юу – М.: БИНОМ. Лабратория знаний, 2006. – 317 с.: ил.
- [2] Вольф Э., Мандель Л. Когерентные свойства оптических полей. I // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 87. – №. 11. – С. 491-520.

# **Investigation of coherent and polarization characteristics of scattered laser radiation in the quality control of optical parts surfaces**

*D. G. Denisov, V. E. Karassik*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The results of theoretical studies devoted to the study of the coherent properties of optical radiation sources are analyzed. The concepts of temporal and spatial coherence of a quasi-monochromatic radiation source, as well as the concept of the area and volume of a quantum-mechanical cell in a certain region of space for a certain source of optical radiation are considered. For the analyzed volume of coherence, the average number of photons in a certain spin state is considered, which determines the degeneracy parameter of laser radiation (electromagnetic field) in quantum statistics.

*Keywords:* Temporal coherence, Spatial coherence, Laser radiation degeneracy parameter, Laser radiation polarization.

# Цифровая мера для метрологического обеспечения видеоизмерительных систем

*В. Л. Минаев, Г. Г. Левин, Г. Н. Вишняков, А. А. Голополосов*

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

В настоящей работе рассматривается вопрос создания цифровой меры для поверки (калибровки) видеоизмерительных систем на базе цифрового монитора. Описана методика передачи единицы длины на такую меру с помощью оптической системы (камеры с объективом) и эталонного интерферометра перемещений. Использование алгоритма субпиксельной обработки изображения и интерполяции сигнала позволяет повысить точность калибровки и снизить влияния геометрических aberrаций оптической системы на результаты измерений.

*Ключевые слова:* Метрология, Цифровая мера, Длина, Монитор.

*Цитирование:* **Минаев, В. Л.** Цифровая мера для метрологического обеспечения видеоизмерительных систем / В. Л. Минаев, Г. Г. Левин, Г. Н. Вишняков, А. А. Голополосов // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 242–245.

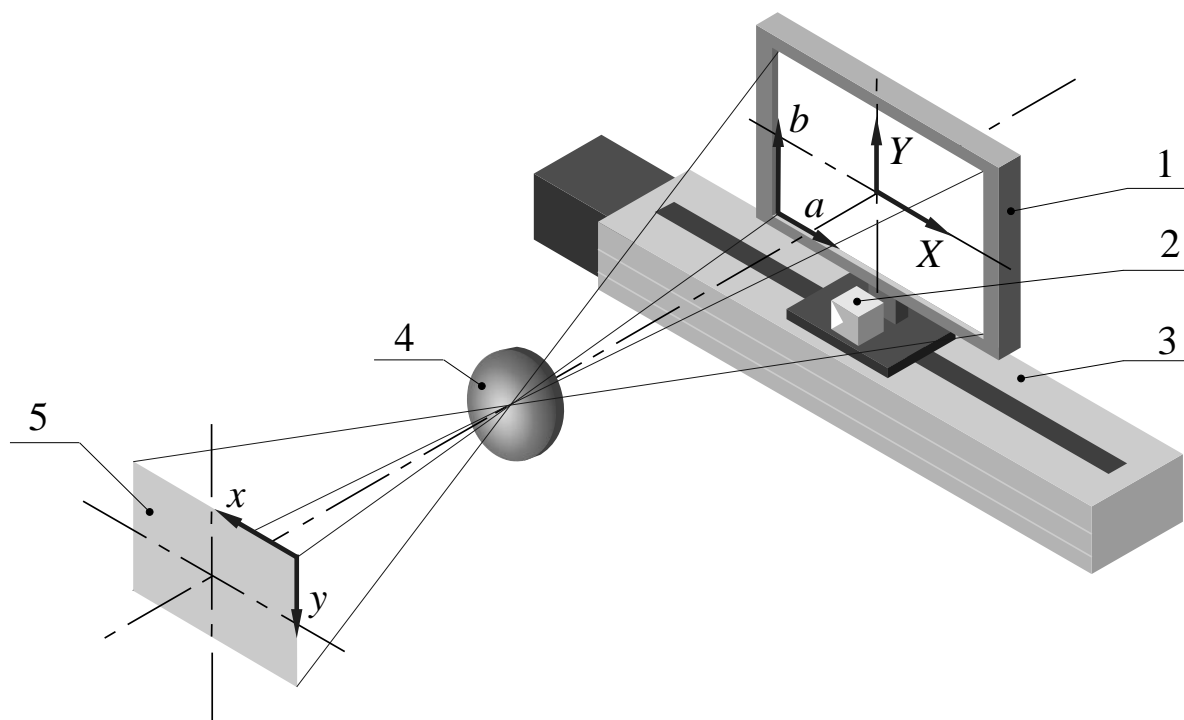
В настоящее время широко распространяются средства измерений, основанные на обработке видеоизображений или видеоизмерительные системы (ВИС), а в Федеральный информационный фонд вводятся новые средства бесконтактных измерений длины [1]. В первую очередь можно подчеркнуть 2D ВИС — проекционные системы, видеомикроскопы, различные комплексы видеофиксации, а также 3D измерительные ВИС, на основе триангуляции в структурированном свете и видеограмметрические.

В соответствии с государственной поверочной схемой (ГПС) для средств измерений длины, поверка таких ВИС осуществляется путем сравнения с мерой длины, в качестве которой выступают штриховые меры, концевые меры, специализированные меры и рулетки [2, 3]. Как правило такие меры ограничены по диапазону измерения и обеспечивают измерение лишь по одной координате (1D мера).

Перспективным направлением развития таких эталонов является создание цифровых мер на базе дисплея монитора (2D мера) Высокая точность изготовления матриц мониторов и возможность вывода на них различной информации от компьютера позволяет использовать их в качестве гибкого инструмента для оценки различных параметров ВИС: разрешающей способности, частотно-контрастных характеристик, оценки геометрических искажений и пр. Причем такие измерения могут проводиться не только в статическом, но и динамическом режиме. Однако для использования цифровых мониторов в качестве мер необходимо, чтобы расстояния между отдельными пикселями были откалиброваны.

В настоящей работе рассматривается вопрос создания цифровой меры для поверки (калибровки) ВИС на базе цифрового монитора, а также методика передачи единицы длины на такую меру с помощью эталонного интерферометра перемещений.

Суть калибровки цифровых мер на основе монитора заключается в передаче единицы длины от интерферометра перемещения на пиксели монитора. Для этого может быть использована представленная на рис. 3 измерительная схема (рис. 1). Для этого на каретку вместе с уголковым отражателем 2 параллельно оси перемещения каретки устанавливается монитор 1. Перед монитором ставится видеоизмерительная система, состоящая из объектива 4, формирующего изображение на фотоприёмной матрице 5 видеокамеры.



1 – калибруемый монитор; 2 – уголковый отражатель; 3 – транслятор; 4 – оптическая система; 5 – фотоприёмная матрица.

**Рис. 1.** Схема калибровки монитора

Для дальнейшего описания методики в полученной схеме рассмотрим три системы координат (СК):

- Система координат изображения, выводимого на калибруемый монитор 1. Назовем её «СК монитора» и обозначим как  $aOb$ . Ось  $Oa$  лежит вдоль горизонтальной стороны монитора, а ось  $Ob$  вдоль вертикальной.

- Система координат транслятора 2. Назовем её «СК объекта» и обозначим как  $XOY$ . Ось  $OX$  направлена вдоль оси перемещения, а ось  $OY$ , в идеальном случае, лежит параллельно плоскости  $aOb$ .

- Система координат изображения, формируемого на фотоприёмной матрице объективом. Назовем её «СК камеры» и обозначим как  $xOy$ .

В СК монитора  $aOb$  определяется набор точек  $G_{i,j} = (i \cdot \Delta_m, j \cdot \Delta_m)$  разбивающий матрицу монитора на точечную сетку с известным в пикселях расстоянием  $\Delta_m$  между соседними элементами. Назовем  $G_{i,j}$  множеством контрольных точек. В процессе калибровки определяются расстояния  $\delta X_{i,j}$  между соседними контрольными точками  $G_{i,j}$  и  $G_{i+1,j}$  в СК объекта  $XOY$ .

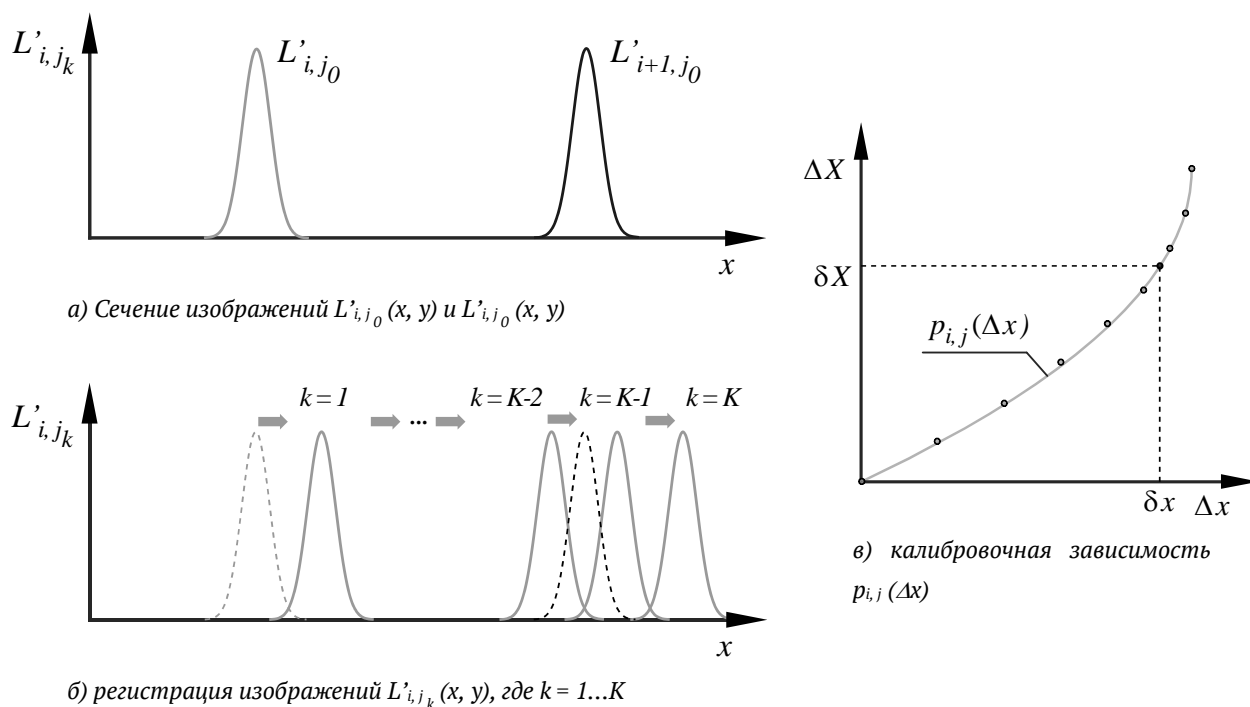
Рассмотрим алгоритм вычисления расстояния  $\delta X_{i,j}$  для некоторых двух точек  $G_{i,j}$  и  $G_{i+1,j}$ :

1) На монитор последовательно выводятся изображения  $L_{i,j}(a, b)$  и  $L_{i+1,j}(a, b)$  распределение яркости в которых определяется выражением:

$$L_{i,j}(a, b) = H \cdot \exp[-(\alpha(a - i \cdot \Delta_m)^2 + \beta(b - j \cdot \Delta_m)^2)],$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные коэффициенты;  $H$  – максимальная разрядность системы вывода изображения ( $H = 255$ ). Область определения данной функции:  $a = [1 \dots A]$  и  $b = [1 \dots B]$ , где  $A \times B$  – разрешение монитора.

2) Матрицей камеры фиксируются соответствующие изображения  $L'_{i,j_0}(x, y)$  и  $L'_{i+1,j_0}(x, y)$  (рис. 2а).



**Рис. 2.** Процесс построения калибровочной кривой

3) С помощью корреляционного алгоритма [4] вычисляется смещение  $\delta x_{i,j}$  в СК камеры между изображениями  $L'_{i,j_0}(x, y)$  и  $L'_{i+1,j_0}(x, y)$ . Использование такого алгоритма позволяет вычислить расстояние с точностью до десятых долей пикселя (субпиксельное разрешение).

4) С помощью транслятора каретка с монитором и уголковым отражателем смещается вдоль оси  $OX$  на величину  $\Delta X$ , которая определяется с помощью интерферометра перемещения (на рис. 1 не указан). На монитор выводится изображение  $L_{i,j}(a, b)$  и с камеры получаем смещенное изображение  $L'_{i,j_1}(x, y)$ . Затем монитор еще раз смещается на величину

$\Delta X$  и операция повторяется. Так происходит  $K$  раз до тех пор, пока суммарное смещение не станет больше предполагаемого расстояния между контрольными точками. Таким образом для каждого  $k \cdot \Delta X$  получаем ряд изображений  $L'_{i,j_k}(x, y)$ , где  $k = 0 \dots K$  (рис. 2б).

Для каждого изображения  $L'_{i,j_k}(x, y)$  корреляционным алгоритмом также вычисляется смещение  $\Delta x_{i,j_k}$  в СК камеры относительно начального положения  $L'_{i,j_0}(x, y)$ .

Строится калибровочная кривая (рис. 2в): зависимость  $k \cdot \Delta X = f(\Delta x_{i,j_k})$ , которая определяет соответствие между СК камеры и СК объекта.

Построенная кривая аппроксимируется полиномом  $p_{i,j}(\Delta x)$  второго порядка. Полученная зависимость используется для определения расстояния между контрольными точками в СК объекта:

$$\delta X_{i,j} = p_{i,j}(\delta x_{i,j})$$

Особенность представленной методики калибровки заключается в достижении высокой точность за счет использования субпиксельного разрешения, а также снижения требований к геометрическим aberrациям оптической системы за счет аппроксимации полученных данных.

### Список источников

- [1] Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений / URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry>
- [2] **Челпанов И. Б., Прямыцын И. Б., Кочетков А. В.** Метрологическое обеспечение лазерных измерительных 3D-сканеров // Законодательная и прикладная метрология. — 2016. — №6 (145) — С. 26–31.
- [3] **Приказ №2840.** Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.12.2018 г.
- [4] **Левин Г. Г., Илюшин Я. А., Минаев В. Л., Моисеев Н. Н.** Определение наноперемещений объекта по оптическому фазовому изображению // Измерительная техника. — 2010. — №7. — С. 38–42.

## Digital standard for metrological support of video measuring systems

*G. N. Vishnyakov, V. Minaev, G. Levin, A. Goloposov*

FGUP VNIIOFI, Moscow, Russia

In this paper, we consider the issue of creating a digital standard for verification (calibration) of video measuring systems based on a digital monitor. A technique for transferring a unit of length to such a standard using an optical system (a camera with a lens) and a reference displacement interferometer is described. The use of the algorithm of subpixel image processing and signal interpolation makes it possible to increase the accuracy of calibration and reduce the influence of geometric aberrations of the optical system on the measurement results.

*Keywords:* Digital standard, Video measuring systems, Displacement interferometer.

# Определение влияния качества кварцевого стекла на изготовление пластины маятника акселерометра

*И. Ю. Цельмина*

Раменский приборостроительный завод АО «РПЗ»

В настоящей работе приведены сравнительные результаты измерений пластин акселерометров из различных партий материала с применением таких средств измерений, как лазерный конфокальный сканирующий микроскоп с функцией профилометра и поляризационный микроскоп.

*Ключевые слова:* Оптика, Кварцевые акселерометры, Сканирующие микроскопы, Кварцевое стекло.

*Цитирование:* **Цельмина, И. Ю.** Определение влияния качества кварцевого стекла на изготовление пластины маятника акселерометра / И. Ю. Цельмина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 246–250.

## Введение

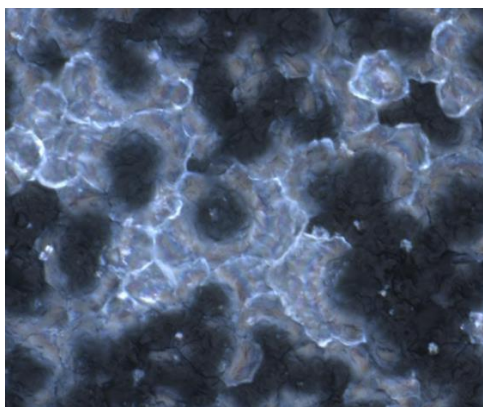
Прецизионные маятниковые кварцевые акселерометры [1] предназначены для измерения линейных ускорений. Основным конструкционным элементом маятника является кварцевая пластина, от точности изготовления которой зависит чувствительность датчика. Предъявляются высокие требования как к геометрии пластин, так и однородности материала, из которого они изготавливаются. Основными контролируемыми параметрами являются — геометрия маятника и точность формирования перемычек методом травления, обеспечивающих подвижность маятника.

Оптимальный материал для изготовления пластины маятника - синтетическое кварцевое стекло типа КУ-1. Критичными параметрами для кварцевого материала в таких изделиях являются его оптическая однородность, отсутствие пузырей и включений, высокая добротность, отсутствие внутренних напряжений.

Для получения заданных параметров, а также для отработки технологических процессов изготовления изделий необходимо применять интерференционные и микроскопические методы и соответствующие средства измерений.

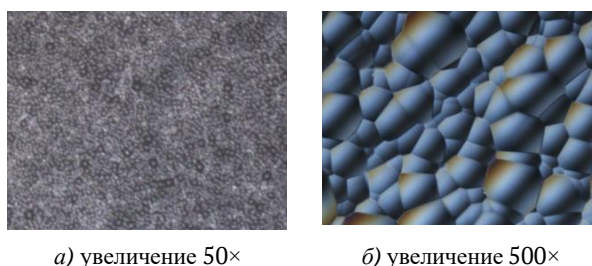
## 1. Эксперимент

На этапе отжига заготовок пластин акселерометра иногда может произойти видимое невооруженным глазом изменение внешнего вида поверхности некоторых пластин. После исследования поверхности пластин на микроскопе с применением 100× объектива обнаружилось микрорасслоение поверхностного слоя, представленного на рисунке 1.



**Рис. 1.** Поверхностное микрорасслоение материала заготовок пластин

Для исследования этого микрорасслоения пластины в дальнейшем прошли этапы шлифования и химического травления в смеси фтористоводородной и серной кислот (см. рисунок 2), затем полирование методом свободного абразива. Работы проводились параллельно с партией, не имеющей дефекта микрорасслоений поверхности на этапе отжига.



**Рис. 2.** Внешний вид поверхности пластины после шлифования и химической полировки на лазерном конфокальном микроскопе

После этапов полной механической обработки и дополнительного химического травления пластины с микрорасслоением стали прозрачными, без оптических дефектов поверхности. Но, на партии текущего производства проявился эффект «мерцания» поверхностей, видимый под микроскопом стереоскопическим панкратическим МСП, при увеличении 25×. При более глубоком исследовании материала пластины на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе с использованием 100× объектива было видно хаотичное распределение тетраэдров, которые представлены на рисунке 3.



**Рис. 3.** Хаотичное распределение тетраэдров



Далее обе партии деталей прошли путь до полного изготовления пластин акселерометра: лазерную резку, формирование «платиков», перемычек и нанесение покрытия.

Размеры перемычек измеряли лазерным методом определения толщины нанопленок, при помощи лазерного конфокального микроскопа. Этим же методом определено расположение пузырей в толщине перемычек. Предварительные измерения выполняли на металлографическом микроскопе в темном и светлом поле.

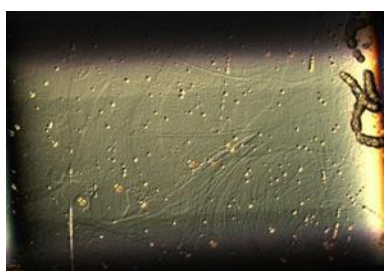
Затем, партию деталей с обнаруженным микрорасслоением на этапе отжига запустили в сборку акселерометра для испытательных работ.

## 2. Результат

При формировании перемычек на пластинах с микрорасслоением поверхности крупные пузыри большей частью образовались в области галтелей и, частично, в зоне перемычки (см. рисунок 4а), причем мелкие пузыри расположены по всей области перемычки. Сама поверхность также имеет неровности (см. рисунок 4б). На «платиках» и основном теле детали такого эффекта нет. На рисунке 4в показано образование в виде мелкочаеистой субструктуры материала [2].

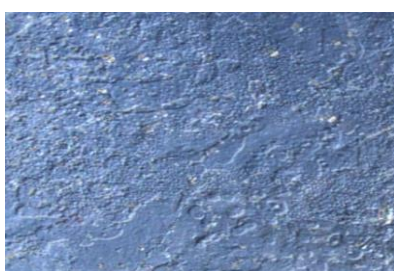
В пластинах с обнаруженными тетраэдрами пузыри образовались по всему приповерхностному слою перемычек и детали в целом (см. рисунок 5а, б), хотя поверхность перемычек ровная и соответствует требуемым размерам (см. рисунок 5в). Измерение методом тонких пленок на конфокальном лазерном микроскопе позволило увидеть расположение пузырей в области перемычек пластины. Хотя невооруженным глазом и при помощи микроскопов типа МСП, поверхность смотрится как в раковинах.

Детали из обеих партий по геометрическим параметрам соответствовали требованиям. После прохождения сборки, регулировки и испытаний акселерометры соответствовали требуемым характеристикам.



а) перемычка с покрытием.

Просматриваются крупные пузыри в области галтели и мелкие, рассеянные по всей поверхности

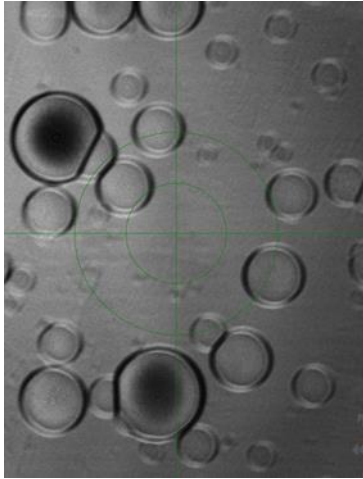


б) неровность поверхности перемычки без покрытия

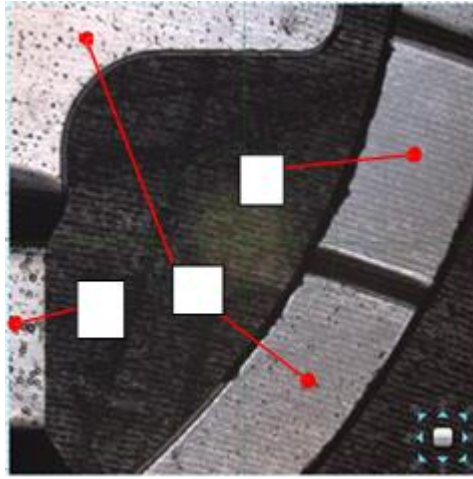


в) мелкочаеистая субструктура материала [2]

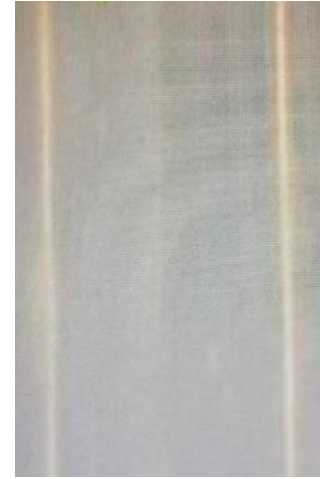
**Рис. 4.** Изображение фрагментов пластины акселерометра с микрорасслоением на этапе отжига



а) прохождение тела перемычки в приповерхностной области. Лазерное излучение, метод тонких пленок. Лазерный сканирующий микроскоп



б) фрагмент пластины акселерометра после формирования перемычек, до покрытия, где 1 – перемычка, 2- основное тело детали, 3 – «пластик». Лазерный сканирующий микроскоп



в) изображение отраженных поверхностей перемычки пластины на металлографическом микроскопе

**Рис. 5.** Изображение фрагментов пластины акселерометра без покрытия с обнаруженными тетраэдрами в материале

### Заключение

На работоспособность акселерометров описанный дефект материала не оказал влияния, собрано более 30 акселерометров с пластинами из такого материала. Однако, данный дефект материала усложняет работу при изготовлении пластины акселерометра и значительно увеличивает отход деталей на этапе их производства.

Четко проявляются субструктура и дефекты кварцевого стекла в виде газовых пузырей, образующихся в период расплава материала при химическом травлении [2]. Чем больше величина съема материала, тем больше газовых пузырей.

Во время химического травления проявленные субструктуры и дефекты кварцевого стекла невозможно выявить на этапе входного контроля заготовок материала.

Данная структура образовалась в приповерхностном слое материала. Сама поверхность перемычек ровная и основная толщина материала в перемычках однородная. Это подтверждается исследованием перемычек методом тонких пленок.

### Благодарность

Особую благодарность выражаю своему непосредственному руководителю, заместителю главного инженера и руководителю по направлению лазерной техники, Федорову Андрею Евгеньевичу, позволившему выполнить данную работу и оказавшему поддержку на всем этапе ее выполнения.

### Список источников

- [1] **Ветрова, Е. В.** Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров / И. П. Смирнов, Д. В. Козлов, В. М. Запетляев // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – том 4 – выпуск 2, с. 95-102.
- [2] **Волков, П. В.** Исследование микроструктуры поверхностей кварцевого стекла, подвергнутых химическому и гидротермальному травлению / Брызгалов А.Н. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4.

## Determination of the influence of quartz glass quality on the manufacture of the accelerometer pendulum plate

*I. Y. Tselmina*

Ramenskoe instrument-making Plant of JSC “RPZ”

The report presents comparative results of measurements of accelerometer plates from different batches of material using such measuring instruments as a laser confocal scanning microscope with a profilometer function and a polarizing microscope. The results of assessing the quality of accelerometers are also presented.

*Keywords:* Optics, Quartz accelerometers, Quartz glass, Laser confocal scanning microscope.

# Подходы к исследованию эванесцентного поля поверхностных плазмон-поляритонов на ТГц излучении Новосибирского лазера на свободных электронах

*В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов*

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В данной работе будут рассмотрены экспериментальные подходы к измерению затухания интенсивности эванесцентного поля ППП: зондовый метод с внешней модуляцией и модуляцией колебаниями самого зонда, а также регистрация поля, возникающего после дифракции ППП на краю проводящей поверхности. Тестовые эксперименты на структуре «золото-ZnS-воздух» с использованием ТГц излучения Новосибирского лазера на свободных электронах показали согласие результатов по глубине проникновения поля в воздух для обоих способов модуляции, что свидетельствует о достоверности результатов и работоспособности методов регистрации.

*Ключевые слова:* Терагерцовый диапазон, Поверхностные-плазмон поляритоны, Проводящие поверхности.

*Цитирование:* **Кукотенко, В. Д.** Подходы к исследованию эванесцентного поля поверхностных плазмон-поляритонов на ТГц излучении Новосибирского лазера на свободных электронах / В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 251–255.

## Введение

Одним из применений терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся вдоль границы раздела проводник-диэлектрик, является рефрактометрия волноведущей поверхности. В качестве проводника может выступать металл, диэлектрик в линии поглощения или допированный полупроводник. По измеряемым характеристикам ППП (длине распространения вдоль границы раздела, фазовой скорости и глубине проникновения поля ППП в диэлектрик) можно восстановить оптические свойства проводника, что важно для задач диагностики качества поверхностей и тонких пленок, сенсорики и др. В отличие от видимого диапазона, все благородные металлы имеют высокую проводимость в ТГц диапазоне частот, в результате чего поле ППП в диэлектрике слабо связано с поверхностью и присутствуют большие радиационные потери интенсивности плазмонов даже на небольших шероховатостях и неоднородностях [1].

### 1. Поверхностный-плазмон поляритон

ППП — это комбинация электромагнитной волны и волны свободных зарядов, которые распространяются вдоль границы проводник-диэлектрик, схематичное изображение ППП представлено на рис.1. Электромагнитное поле экспоненциально затухает на границе проводник- диэлектрик и описывается формулой 1:

$$E(z, x) = E_0 \exp(-kz) \exp(ik_x x), \quad (1)$$

где  $E_0$  – амплитуда эванесцентного поля ППП,  $k_x$  – вектор ППП, распространяющихся вдоль оси  $x$ ,  $k$  – константа затухания поля ППП в воздух (вдоль оси  $z$ ).

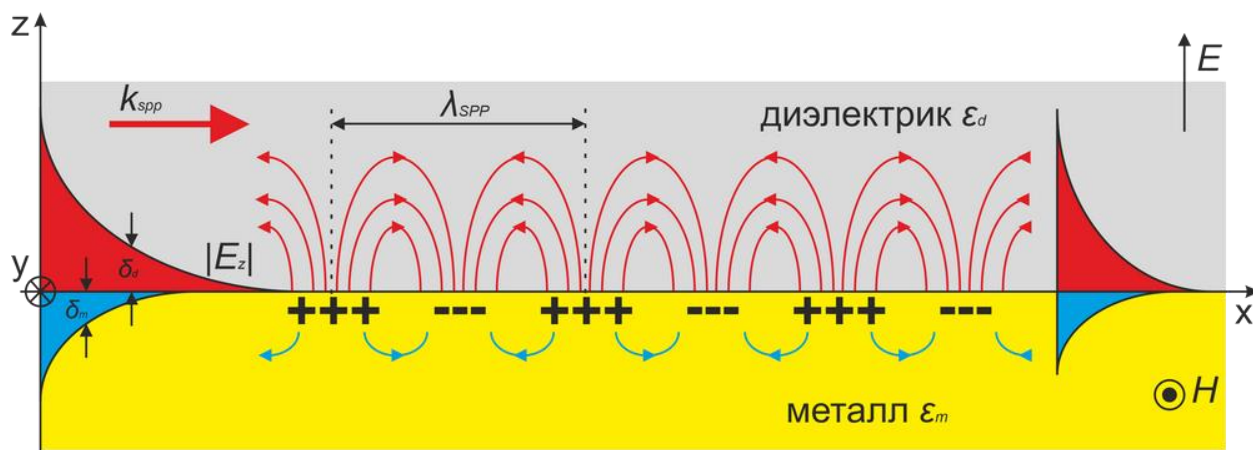


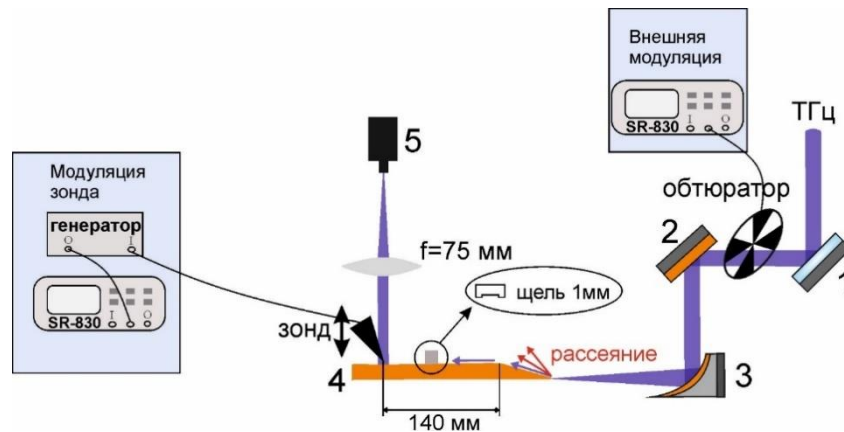
Рис. 1. Иллюстративное изображение ППП [2]

Свойства электромагнитных полей зависят от оптических констант проводника и диэлектрика. Таким образом, измеряя распределение поля наряду с другими характеристиками ППП (длина распространения ППП вдоль поверхности или их фазовая скорость) мы можем получать оптические константы материалов (полупроводник, металл, диэлектрик).

## 2. Оптическая схема

Для детектирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) зондовым методом использовалась установка, представленная на рис.2. Луч лазера, отражаясь от юстировочного зеркала 1, попадал на зеркало 2, с золотым напылением. Далее параболическим зеркалом 3 с фокусным расстоянием  $f = 75$  мм пучок фокусировался на ребро торца образца 4, представляющего собой плоскую стеклянную пластинку с нанесенным на ее полированную верхнюю грань непрозрачного слоя золота толщиной 300 нм методом магнетронного напыления. Поверх золота методом электронно-лучевого распыления наносился слой сульфида цинка (ZnS) толщиной 700 нм.

Сфокусированное на ребро образца излучение в следствии дифракции частично преобразовывалось в ППП, которые затем распространялись вдоль поверхности образца. Образец имел плавный загиб на 13 градусов для того, чтобы экранирования от паразитных объемных волн, которые возникали при дифракции излучения на ребре. По той же причине для экранирования от засветок в центре образца устанавливались «ворота» из поролонa с вертикальной щелью размером 1 мм. На другом краю образца ППП рассеивались металлическим зондом, колеблющимся с частотой и амплитудой задаваемой на генераторе. Рассеянное излучение собиралось линзой (в схеме  $2f-2f$ ) с фокусным расстоянием  $f = 75$  мм и фокусировалось на входной апертуре ячейки Голя 5.

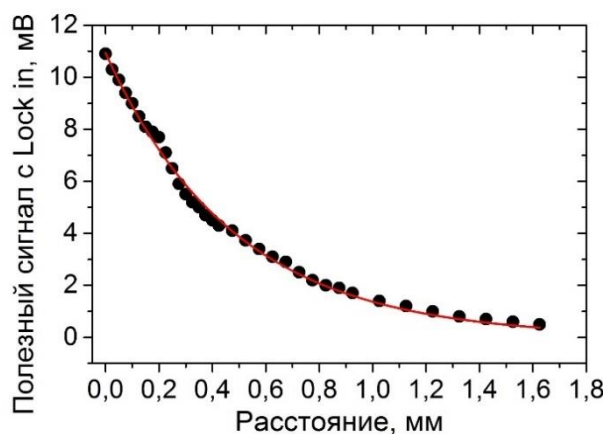


**Рис. 2.** Установка для детектирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) зондовым методом

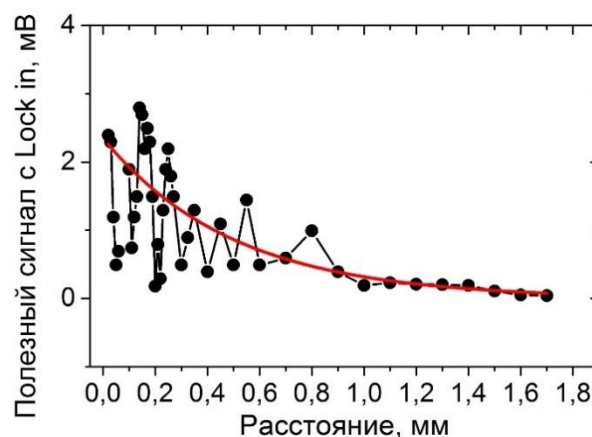
В схеме использовалось два вида модуляции. Первый – это уже упомянутая модуляция зонда, она реализовывалась с помощью генератора. Второй – внешняя модуляция, реализуемая с помощью механического обтюратора, помещаемого на входе в установку. Сигнал от Голея синхронно с опорной частотой обтюратора приходили на синхронный детектор (SR-830). Внешний тип модуляции использовался при задании с помощью поляризатора максимальной допустимой мощности, подаваемой на вход системы, для измерения поля ППП.

### 3. Результаты экспериментов

Для детектирования ППП зондовым методом использовалась установка, изображенная на рис.2. Для графиков на рисунке 3 из полезного сигнала вычиталось измеренное значение шума. В данном эксперименте измерялся абсолютный уровень шума, то есть значение, измеряемое детектором при отсутствии излучения. По результатам экспоненциальной аппроксимации графика на рисунке 3а глубина проникновения ППП в воздух (по интенсивности) составила  $d_p = 0,48 \pm 0,01$  мм. На рисунке 3б представлены измерения с колебаниями зонда. При максимально подаваемом напряжении на зонд была измерена зависимость полезного сигнала с синхронного детектора от расстояния. Глубина проникновения составила  $d_p = 0,49 \pm 0,15$  мм.



а) Использовалась внешняя модуляция  
 $\nu=30$  Гц. Уровень шума 0,3 мВ.



б) Использовалась модуляция зонда. Уровень шума  
 0,01 мВ.

**Рис. 3.** Зависимость полезного сигнала от расстояния, на которое поднимался зонд от поверхности образца

### Заключение

Собрана экспериментальная установка по детектированию затухания поля ППП над поверхностью проводника зондовым методом с внешней модуляцией и модуляцией колебаниями зонда. Тестовые эксперименты на структуре «золото-ZnS-воздух» показали согласие результатов по глубине проникновения поля в воздух между двумя видами модуляции, что свидетельствует о достоверности результатов и работоспособности методов регистрации. Предварительный анализ шумовых характеристик установки показал, что использование более высокочастотной модуляции позволит повысить соотношение сигнал/шум в зондовой схеме.

### Благодарность

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН.

### Список источников

- [1] **Gerasimov, V. V.** Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating / B. A. Knyazev, A. G. Lemzyakov, A. K. Nikitin, G. N. Zhizhin. // Journal of Optical Society of America B. V. 33, Is. 11, P. 2196-2203 (2016).
- [2] URL: <https://www.rscf.ru/project/19-12-00103/>

# **Approaches to the study of the evanescent field of surface plasmon polaritons at the Novosibirsk free electron laser**

*V. D. Kukotenko, V. V. Gerasimov*

Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Waveguide surface refractometry is one of the applications of terahertz surface plasmon polaritons (SPP) propagating along the conductor-insulator interface. The conductor can be a metal, a dielectric in the absorption line, or a doped semiconductor. Measuring of characteristics of SPP (propagation length along the interface, phase velocity and depth of penetration of the SPP field into the dielectric) allowed restoration of the optical properties of the conductor, which is important for the problems of diagnosing the quality of surfaces and thin films, sensorics, etc. In this work, we consider experimental approaches to measuring the attenuation of the intensity of the SPP evanescent field: the probe method with external modulation and modulation by the oscillations of the probe itself, as well as the registration of the field arising after SPP diffraction at the edge of the conducting surface.

*Keywords:* Optics, Surface-plasmon polariton, Terahertz range, Metal, Dielectric.



# Макет эталонного дальномера в диапазоне до 600 м на основе фемтосекундного лазера

*Д. А. Соколов*

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, р.п. Менделеево, г. Солнечногорск, Московская обл., Российская Федерация

В работе приведены результаты испытаний макета измерительного комплекса длины на основе фемтосекундного лазера в диапазоне 64 м ... 600 м в лабораторных и полевых условиях, оценена погрешность разрабатываемого макета при воспроизведении единицы длины на максимальной дистанции. Приведены значения соотношений сигнал/шум в данном диапазоне, которые составляют от 15 до 300 единиц. Исследованы метрологические характеристики макета, в части СКО ( $S_{\Sigma}$ ), в лабораторных условиях до 311 м  $S_{\Sigma} = 13$  мкм, а в полевых на дистанциях: 572 м  $S_{\Sigma} = 10$  мкм. В целом испытания макета показали высокие точностные характеристики, а запас мощности и соотношение сигнал/шум позволяют увеличить диапазон воспроизведения единицы длины.

*Ключевые слова:* фемтосекундный лазер, эталонный дальномер до 600 м.

*Цитирование:* Соколов, Д. А. Макет эталонного дальномера в диапазоне до 600 м на основе фемтосекундного лазера / Д. А. Соколов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 256–261.

## Введение

В связи с расширением задач измерения длины и повышенного внимания к высокоточным измерениям больших длин в машиностроении, мониторинге промышленных объектов, геодезии, картографии и т.д. Возрастают требования к точности средств измерения длины в диапазоне до 600 м, а также к эталонам возглавляющих поверочную схему.

В исследуемом диапазоне измерения длины с учетом специфики применения разрабатываемого макета наиболее перспективными являются технологии:

- EDM (электронные измерения расстояний) является наиболее распространенным способом измерения больших расстояний. Основой реализации технологии EDM является оптоэлектронный способ сдвига фазы амплитудно-модулированного лазерного излучения. В сравнении с интерференционным способом основанного на применении технологии EDM, на порядки ниже, но позволяет проводить однозначные измерения на больших расстояниях, не используя непрерывную измерительную линию.

- Благодаря достижениям в освоении фемтосекундных технологий данные лазерные источники излучения стали применяться в области измерения длин. Если частота повторения фемтосекундных импульсов привязана по фазе к стандарту частоты, то такие измерения могут быть приведены в соответствие с международным определением метра. Причем фемтосекундный лазер можно применять как в интерференционных, так и в EDM системах, а также их комбинации в одном приборе, что позволяет уменьшить диапазон

неоднозначности измерений с одной стороны и повысить точность до уровня интерференционной с другой.

### **1. Макет эталонного дальномера**

В данной работе применены фемтосекундные технологии для дальномерных измерений. В целях обеспечения единства измерений больших длин была проведена разработка и исследование макета эталона единицы длины на основе фемтосекундного лазера, обеспечивающего независимое воспроизведение, хранение и передачу единицы длины в соответствующем диапазоне [1, 2, 3].

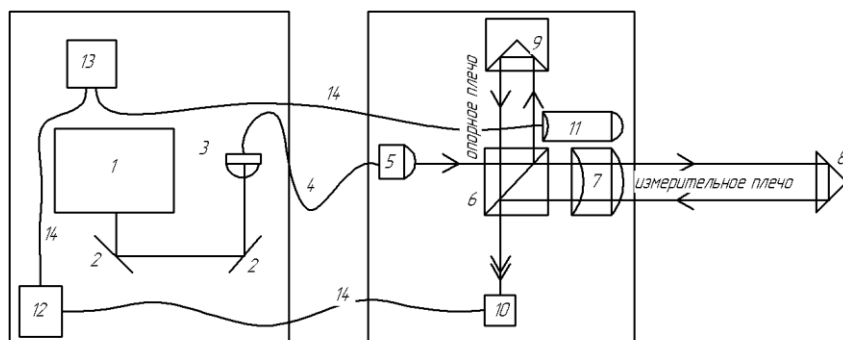
Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Оценка возможности применения разрабатываемого макета для измерения длин до 600 м.
2. Оценка погрешности разрабатываемого макета.
3. Проверка работоспособности разрабатываемого макета на дистанциях 60 м, 300 м, 600 м.
4. Оценивание характеристик входного сигнала разрабатываемого макета на дистанциях 60 м, 300 м, 600 м.
5. Вычисление погрешности измерения (СКО) длины разрабатываемого макета на 60 м, 300 м, 600 м.

На рисунке 1 приведена схема установки реализующая макет эталона длины на основе фемтосекундного лазера [4]. Вдоль измерительного плеча перемещается отражатель 8, изменяя разность хода волн между плечами интерферометра, а аппаратура приема 10 регистрирует сигналы интерференции.

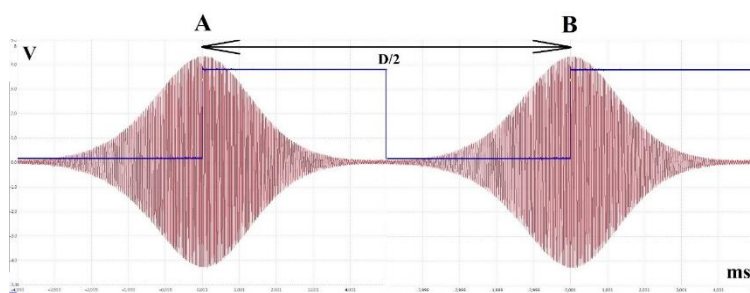
Устройство внутрифазовой модуляции 9 периодически (частотой 3 Гц) изменяет разность хода волн между опорным и измерительным плечом интерферометра, что позволяет регистрировать совпадения фемтосекундных импульсов при визуальной и цифровой обработке сигнала [2].

Источником излучения является фемтосекундный лазер 1 на длине волны 0,780 мкм с системой стабилизации частоты повторения импульсов 61 МГц. Для получения высокой стабильности частоты повторения импульсов используется метод фазовой подстройки по частоте от внешнего опорного рубидиевого стандарта частоты [5].



1- стабилизированный фемтосекундный лазер; 2- плоские зеркала; 3 – волоконный ввод; 4 – оптическое волокно; 5 – волоконный коллиматор; 6 - делительный кубик; 7 – коллиматор; 8 - пустотелый уголкоый отражатель; 9 - устройство внутрифазовой модуляции и пустотелый уголкоый отражатель; 10 - аппаратура приема лазерного излучения; 11 – система визуального контроля наведения на отражатель; 12 – система обработки сигнала; 13 – ноутбук; 14 – электрические кабели

**Рис. 1.** Принципиальная схема лазерного дальномера



**Рис. 2.** Сигнал интерференции фемтосекундных импульсов при перемещении отражателя измерительного плеча

На рисунке 2 представлен сигнал интерференции двух совмещенных в пространстве лазерных пучков, в зависимости от положения отражателя 8 (рис. 1) вдоль распространения измерительного плеча интерферометра [6]. Данная картина возникает в результате работы устройства внутрифазовой модуляции и совпадении фемтосекундных импульсов [4] от опорного и измерительного плеча.

В результате расчета мощности выходящего лазерного излучения из оптической системы на измерительную линию с использованием паспортных данных составных элементов и измерений их коэффициентов отражений была оценена: мощность лазерного излучения на выходе из оптической системы на измерительную линию 12,2 мВт, мощность лазерного излучения на входе в оптическую систему с измерительной линии 600 м в ясную погоду 0,07 мВт и минимальная мощность на входе в оптическую систему с измерительной линии 0,03 мВт. Данные результаты подтверждают возможность применения разрабатываемой оптической системы в исследуемом диапазоне длин.

На основе паспортных данных и теоретических оценок бюджет погрешности разрабатываемого метода воспроизведения единицы длины имеет следующие составляющие:

- частота повторения импульсов лазера,

- дифракционная составляющая,
- температура,
- давление,
- относительная влажность,
- концентрация CO<sub>2</sub>,
- расчёт по формуле,
- неоднородность внешних условий,
- Аббе угла наклона отражателя,
- дальномерная поправка,
- механизм фиксации трегера,
- косинусная ошибка.

Суммарная н.с.п. результата измерения длины 600 м составляет:  $\Theta_{0,95} = 195,2$  мкм

## 2. Экспериментальные исследования

С помощью исследуемого макета:

- проведена серия измерений по воспроизведению длины 60 м в лабораторных условиях на макете эталонного измерительного комплекса длины в диапазоне до 60 м [4]:

- СКО измерения длины 2426,771 мм составляет 0,005 мм;
- СКО измерения длины 24267,700 мм составляет 0,002 мм;
- СКО измерения длины 58242,481 мм составляет 0,005 мм;
- Соотношение сигнал/шум на дистанции 64 м составило 300 единиц;

- проведена серия измерений по воспроизведению и измерению длины до 311 м в лабораторных условиях на макете эталонного измерительного комплекса длины в диапазоне до 60 м, результаты СКО воспроизведения длины, а также СКО тахеометра ТМ30, используемого в качестве опорного дальномера работающего по EDM технологии, представлены в таблице 1

**Таблица 1.** СКО измеренных расстояний

№	время	ТМ30	S <sub>Σ</sub> , мм	макет	S <sub>Σ</sub> , мм
1	10:35	63,5178	0,16	63,09602	0,005
2	11:05	63,5177	0,15	63,09605	0,005
3	13:15	247,9513	0,18	247,53029	0,011
4	14:05	311,0472	0,17	310,62625	0,010
5	15:00	311,0474	0,16	310,62636	0,013

Соотношение сигнал/шум на дистанции 311 м составило 30 единиц. Серии измерений по воспроизведению длины 572 м в полевых условиях показали следующие результаты: тахеометр ТМ30 измерил данное расстояние с S<sub>Σ</sub> = 0,14 мм, а разрабатываемый макет воспроизвел данную длину с S<sub>Σ</sub> = 0,01 мм. Проведены измерения средних значений сигнала и шума, а также соотношение сигнал/шум, которое составило 15 единиц.

## Заклучение

Для решения некоторых задач метрологического обеспечения длин в диапазоне 64 м ... 600 м была предложена концепция и реализована в виде макета эталона единицы длины, использующего частотную гребенку фемтосекундного лазера, которая имеет систему фазовой стабилизации по тактовому сигналу Rb стандарта частоты и времени. Воспроизведение единицы длины на отметках 64 м, 182 м, 300 м и 575 м было успешно продемонстрировано с СКО не более 13 мкм. Концепция воспроизведения длины предложенная в этом исследовании, найдет свое применение в различных научных и промышленных областях из-за ее высокой точности и прослеживаемости к международному определению метра.

## Список источников

- [1] BIPM, The International System of Units (SI Brochure) [9th edition, 2019], <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [2] Terrien J. News from the Bureau International des Poids et Mesures // Metrologia. – 1975. – Т. 11. – №. 1. – С. 37.
- [3] <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-metre.pdf>
- [4] Соколов Д. А., Олейник-Дзядик О. М., Сильвестров И. С. Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2020. – №. 52. – С. 63-67.
- [5] Патент На Изобретение Ru 2698699 C1/ Способ воспроизведения единицы длины в лазерных дальномерех на основе интерферометра Майкельсона Губин С.А., Соколов Д.А., Татаренков В.М., 29.08.2019. Заявка № 2018147034 От 27.12.2018.
- [6] Sokolov D. The reference range finder based on the femtosecond laser for the length measurement in the range up to 60 m. Design and application // Український метрологічний журнал/Ukrainian Metrological Journal. – 2017. – №. 1A. – С. 31-34.

## Prototype of a reference rangefinder in the range up to 600 m based on a femtosecond laser

*D. A. Sokolov*

FSUE «Russian metrological institute of technical physics and radio engineering», Solnechnogorsk, Russia

The paper presents the results of testing a prototype of a length measuring complex based on a femtosecond laser in the range of 64 m ... 600 m in laboratory and field conditions, the error of the developed model when reproducing a unit of length at a maximum distance is estimated. The values of the signal-to-noise ratios in this range are given, which range from 15 to 300 units. The metrological characteristics of the prototype were investigated, in terms of RMS (S), under laboratory conditions up to 311 m  $S = 13$  microns, and in field conditions at distances: 572 m  $S = 10$

microns. In general, the tests of the prototype showed high accuracy characteristics, and the power reserve and signal-to-noise ratio allow increasing the reproduction range of a unit of length.

*Keywords:* Femtosecond laser, Reference rangefinder up to 600 m.

# Цифровой контроль качества голограмм

Д. Б. Чекунин<sup>1</sup>, И. К. Цыганов<sup>2</sup>, Д. С. Лушников<sup>2</sup>, Е. Ю. Злоказов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт — филиал АО «Гознак», Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>3</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Оценка возможности создания системы цифрового контроля качества голограмм. Этапы развития системы. Пилотная установка и её компоненты. Оцифровка качества голограмм с помощью программно-аппаратного комплекса типа нейронная сеть.

*Ключевые слова:* Контроль качества, Голограмма, Оцифровка.

*Цитирование:* Чекунин, Д. Б. Цифровой контроль качества голограмм / Д. Б. Чекунин, И. К. Цыганов, Д. С. Лушников, Е. Ю. Злоказов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 262–265.

В статье «Обзор известных объективных критериев контроля качества голограмм» [1] были предложены три систематизированных критерия контроля качества дифракционных защитных элементов (ДЗЭ), а также система контроля качества на основе эталонной голограммы. По сути была предложена схема создания цифрового аналога человека-эксперта заменяемого электромеханической системой, отслеживающей одновременно три параметра голограммы с целью полной имитации наблюдения голограммы экспертом для оценки качества дифракционного защитного элемента (далее - ДЗЭ).

Нами была выполнена работа по уточнению формулировки трёх предложенных для оценки качества ДЗЭ основных параметров цифрового контроля:

- максимальная интегральная дифракционная эффективность фиксированной по площади ДЗЭ в нулевом порядке;
- угол полного наблюдения в канонических условиях (селективность) для одного канала записи в одной угловой координате;
- глубина сцены кажущегося восстанавливаемого изображения для выбранного объекта наблюдения (слоя или кадра записи, или участка изображения) определяемая по параллаксу.

Если по первым двум критериям сложностей с фиксацией значения в цифровом виде не возникает, то третий критерий вызывает наибольшие вопросы по принципиальной возможности оцифровки.

На основании результатов работы Ельцова А.В. «Резкость и глубина растровых стереоизображений» [2] было принято решение использовать расчёт ширины полосы нерезкости для определения кажущейся глубины сцены.

Тем самым мы устанавливаем три измеряемых цифровых критерия ДЗЭ достаточных для создания релевантной системы контроля качества голограмм.

Для оценки практической возможности создания эталонной голограммы были изучены результаты коллег из АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань (Россия) «Методика измерений радиусов кривизны и формы сферических поверхностей линз и зеркал, в том числе пробных стекол, на основе использования аттестованных отражательных амплитудных синтезированных голограмм в качестве оптических образцов» [3] в которой были рассмотрены аналогичные задачи. Авторы работы, так же, как и мы, предложили использовать эталонную голограмму и сделали выводы, что при физическом изготовлении системы с такой голограммой возникает не менее пяти неустраняемых ошибок. При этом допуски, предъявляемые к эталону в рамках данной работы, позволили использовать эталон такой точности, однако для решения наших задач выявленные ошибки являются недопустимыми.

Также при предварительной проработке аппаратного оформления оптической схемы запланированного прибора авторы пришли к выводу, что для оценки каждого из предложенных критериев будет необходимо создание собственной уникальной оптической схемы, что приведет к необходимости сборки трёх различных пилотных установок или постоянной перенастройке схемы при смене контролируемого параметра. Реализация такой схемы для эффективной работы в задуманных условиях является практически невозможной.

При выполнении дальнейшего поиска решения было сделано предположение, что технология изготовления ДЗЭ, включает множество этапов, поэтому на каждом из них неизбежно возникают локальные дефекты как дифракционных решёток, так и отражающей поверхности. В связи с этим мы предлагаем концепцию индивидуального дифракционного образа («отпечатка пальца») каждой изготовленной голограммы. То есть, несмотря на то что вся технология изготовления направлена на получение максимальной повторяемости, по итогам ранее проведённых исследований мы знаем, что на каждом технологическом переделе допускаются дефекты, приводящие к возможности изменения дифракционной картины локально в различных частях ДЗЭ. В случае если исследовать ДЗЭ посредством фиксации дифракционного отклика одновременно со всей поверхности голограммы, появляется возможность сравнения таких дифракционных картин. Как с эталонной голограммой, так и между собой. Но как было показано ранее создание эталонной голограммы для решения задачи качества множества ДЗЭ невозможно. Если нельзя организовать прямое сравнение по одному или сразу трём критериям качества ДЗЭ, то надо сравнивать ДЗЭ между собой.

В связи с этим было принято решение заменить эталонную голограмму в принципиальной схеме предлагаемого прибора на программно-аппаратный комплекс на основе нейросетевого моделирования. Суть данного предложения заключается в том, что у нас не единичные изделия, в отличие от коллег, а продукция, изготавливаемая в промышленном масштабе большими тиражами. Данное обстоятельство позволяет нам на относительно небольшом количестве образцов (около 1000 - 2000 единичных экземпляров)



условно идентичных ДЗЭ, выполнить обучение модели нейронной сети и установить технологические допуски для любого индивидуального ДЗЭ той же серии.

Таким образом можно выделить три основные стадии создания системы цифрового контроля качества ДЗЭ.

### **Стадия первая – пилот**

Создание пилотной установки, для подтверждения принципиальной возможности реализации данного метода контроля качества ДЗЭ.

На специально построенном пилотном стенде и специально разработанной тестовой голограмме отрабатываются максимумы методики и возможности собранного комплекса с одновременным набором статистических данных с применением на специально изготовленной партии ДЗЭ.

Пилотная установка включает в себя следующие основные компоненты:

- оптическая схема с коллиматором для освещения всей поверхности ДЗЭ;
- в качестве осветителя предполагается использование постоянного лазера с длиной волны около 555 нм (зелёный);
- система позиционирования образца на базе гексапода;
- в качестве приёмника чёрно-белая CMOS-матрица;
- программно-аппаратный комплекс с нейронной сетью.

На данной стадии необходима работа группы экспертов для релевантного обучения нейронной сети по принципу «плохой-хороший».

### **Стадия вторая – тиражирование**

На основе данных и результатов, полученных в рамках пилота, дорабатываются граничные требования к составляющим комплекса, и к тестовым образцам.

С целью решения задачи автоматизации контроля качества ДЗЭ и обеспечения повторяемости результатов для сертификации метода, и приборов, должно быть построено не менее трёх идентичных частично автоматизированных комплекса с целью создания релевантного лабораторного комплекса оценки качества ДЗЭ.

Одновременно в трёх независимых лабораториях при производстве, должна быть выполнена отработка методики на серийных образцах продукции и выбор объективных «технологических ворот» качества серийных ДЗЭ.

### **Стадия третья – автоматизация**

Создание прототипа автоматического устройства контроля качества ДЗЭ для систем типа «step-repeat».

Адаптация системы для онлайн-контроля в агрегатах постоянного цикла на бумагоделательных машинах, в том числе в процессе промышленного производства продукции, содержащей защитные нити и фольгу с голограммами.

## Заключение

Постройка данной уникальной системы, основанной на цифровом контроле с помощью нейронной сети, позволит выполнять как автоматизированный, так и автоматический контроль качества ДЗЭ в готовых изделиях или на стадии производства.

## Благодарности

Выражаем благодарность за помощь в подготовке доклада В. П. Бессмельцеву и А. А. Гончарскому.

## Список источников

- [1] **Чекунин Д. Б.** Обзор известных объективных критериев контроля качества голограмм / Д. Б. Чекунин, С. Б. Одинокоев // HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 131–134.
- [2] **Ельцов А. В.** Резкость и глубина растровых стереоизображений [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stereogen.ru/Stat1.htm>.
- [3] **Курт В. И.** Методика измерений радиусов кривизны и формы сферических поверхностей линз и зеркал, в том числе пробных стекол, на основе использования аттестованных отражательных амплитудных синтезированных голограмм в качестве оптических образцов / В. И. Курт, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. И. Садрутдинов, Е. В. Яковлев // HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021 — С. 149–152.

## Digital quality control of holograms

*D. B. Chekunin<sup>1</sup>, I. K. Ciganov<sup>2</sup>, D. S. Lushnicov<sup>2</sup>, E. Y. Zlokazov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Research institute - branch office of the Joint Stock Company "Goznak", Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Evaluation of the possibility of creating a digital quality control system for holograms. Stages of system development. The pilot plant and its components. Digitization of the quality of holograms using a software and hardware complex of the "neural network" type.

*Keywords:* Quality control, Hologram, Digitization, Neural network.

# Дифференцирование оптических сигналов с помощью каскадных структур «металл-диэлектрик-металл»

Е. А. Безус<sup>1,2</sup>, А. И. Кашапов<sup>1,2</sup>, Д. А. Быков<sup>1,2</sup>, Л. Л. Досколович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Исследованы оптические свойства «каскадных» структур «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структур), состоящих из нескольких последовательно расположенных трехслойных МДМ-структур. Теоретически показано, что за счет «комбинирования» МДМ-структур, обладающих нулями отражения, можно получить нуль требуемого порядка в спектре отражения каскадной структуры. Наличие такого нуля по угловой или пространственной частоте позволяет использовать такие структуры в качестве оптических дифференциаторов, вычисляющих производные требуемого порядка от профиля падающего оптического сигнала по времени или пространственной координате. Представленные результаты численного моделирования подтверждают возможность применения каскадных МДМ-структур в качестве оптических дифференциаторов высокого порядка. Полученные результаты могут найти применение в системах аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации.

*Ключевые слова:* Нанопотоника, Дифференцирование оптических сигналов, Структуры «металл-диэлектрик-металл», Матрица рассеяния.

*Цитирование:* Безус, Е. А. Дифференцирование оптических сигналов с помощью каскадных структур «металл-диэлектрик-металл» / Е. А. Безус, А. И. Кашапов, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 266–270.

В последние годы наблюдается всплеск интереса к разработке компактных структур фотоники для дифференцирования оптических сигналов, а также для реализации более сложных дифференциальных операторов. Указанные дифференцирующие структуры рассматриваются в качестве перспективной элементной базы для новых электронно-оптических устройств обработки информации [1]. В рамках линейной оптики преобразование оптического сигнала, происходящее при его взаимодействии с дифракционной структурой, может быть описано в рамках теории линейных систем [2, 3]. Передаточная функция (ПФ) дифракционной структуры пропорциональна коэффициенту отражения или пропускания структуры, рассматриваемому как функция угловой или пространственной частоты. Поскольку ПФ идеального дифференциатора, обеспечивающего вычисление  $n$ -ой производной, имеет нуль  $n$ -го порядка на центральной частоте, то необходимым условием для оптического вычисления производной  $n$ -го порядка является наличие нуля  $n$ -го порядка в спектре отражения или пропускания дифракционной структуры. Поскольку нули в спектре отражения (пропускания), как правило, обусловлены

резонансными эффектами возбуждения собственных мод структуры, для оптической реализации операций дифференцирования широко используются резонансные структуры.

Задача получения в спектре дифракционной структуры нуля порядка  $n > 1$  является весьма сложной, и, как правило, требует использования структур, «поддерживающих» несколько резонансов на близких частотах. Базовый подход к получению нуля заданного порядка состоит в использовании т. н. композитных (или каскадных) структур, состоящих из нескольких последовательно расположенных резонансных дифракционных структур. В недавней статье [4] авторов настоящей работы было показано, что простая структура «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структура), состоящая из верхнего металлического слоя, диэлектрического слоя и металлической подложки (оптически непрозрачного металлического слоя), позволяет с высоким качеством реализовать вычисление первой производной по пространственной переменной и во времени. При этом было строго показано, что при заданных материалах, длине волны и угле падения излучения всегда можно получить нуль отражения за счет выбора толщин металлического и диэлектрического слоев МДМ-структуры. В настоящей работе рассмотрены каскадные МДМ-структуры, состоящие из нескольких МДМ-структур. Теоретически и численно показано, что последовательно «объединяя» МДМ-структуры, имеющие нуль отражения, можно получить в спектре отражения каскадной МДМ-структуры нуль заданного порядка. Данный результат обосновывает возможность использования композитных МДМ-структур для оптического вычисления производных заданного порядка. Представленные ниже результаты численного моделирования показывают, что рассматриваемые МДМ-структуры позволяют с высоким качеством реализовать вычисление высших производных профиля падающего оптического сигнала.

Для проведения теоретического анализа воспользуемся формализмом матрицы рассеяния. В общем случае матрица рассеяния слоистой структуры связывает комплексные амплитуды плоских волн  $i_u$  и  $i_d$ , падающих на структуру сверху и снизу, с комплексными амплитудами отраженной и прошедшей волн  $R$  и  $T$ :

$$\begin{bmatrix} T \\ R \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} i_u \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} t & r_D \\ r_U & t \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_d \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $r_U$  и  $r_D$  – комплексные коэффициенты отражения структуры для плоских волн, падающих на структуру сверху и снизу соответственно,  $t$  – комплексный коэффициент пропускания структуры. Элементы матрицы рассеяния являются функциями угловой частоты  $\omega$  и тангенциальной компоненты волнового вектора  $k_{x,0}$  падающих волн. Матрица рассеяния композитной структуры, состоящей из двух структур, описываемых матрицами рассеяния  $\mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{S}_2$  и разделенных диэлектрическим слоем с толщиной  $h$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_d$ , может быть выражена в виде  $\mathbf{S}_c = \mathbf{S}_1 \otimes \mathbf{L} \otimes \mathbf{S}_2$ , где символ  $\otimes$  обозначает т. н. матричное произведение Редхеффера [5], а матрица  $\mathbf{L}$  представляет собой матрицу

рассеяния диэлектрического слоя и имеет вид  $\mathbf{L} = \exp(i\psi)\mathbf{I}$ . В последнем выражении  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,  $\psi = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_d - k_{x,0}^2} h$  – фазовый набег, приобретаемый плоской волной при прохождении через диэлектрический слой,  $k_0 = \omega/c$ ,  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

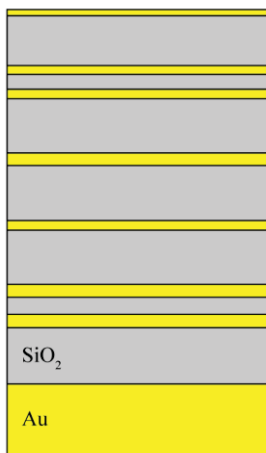
Предположим, что имеются две каскадные МДМ-структуры, обладающие нулями отражения  $n$ -го порядка по частоте на некоторой угловой частоте  $\omega_0$  для волн, падающих на структуру сверху. Матрицы рассеяния  $\mathbf{S}_i$ ,  $i = 1, 2$  таких структур можно представить в виде

$$\mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} t_{i,0} + t_{i,1}(\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] & r_{iD,0} + r_{iD,1}(\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] \\ r_{iU,n}(\omega - \omega_0)^n + r_{iU,n+1}(\omega - \omega_0)^{n+1} + O[(\omega - \omega_0)^{n+2}] & t_{i,0} + t_{i,1}(\omega - \omega_0) + O[(\omega - \omega_0)^2] \end{pmatrix}. \quad (2)$$

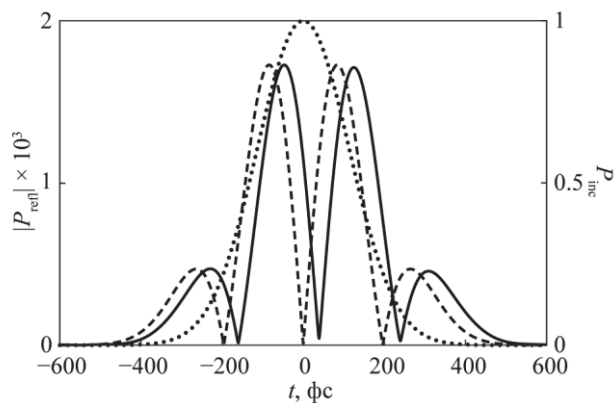
Применяя матричное произведение Редхеффера [5] к матрицам рассеяния  $\mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{S}_2$  (матрицы  $\mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{S}_2$  определяются выражением (2)), можно показать, что каскадная МДМ-структура, составленная из двух указанных структур с нулями отражения  $n$ -го порядка, будет обладать нулем отражения  $(n + 1)$ -го порядка при выполнении условия  $\exp(2ik_{z,0}h)r_{2U,n} = -r_{1U,n}/t_{1,0}^2$ . Аналогично анализу, проведенному в работе [4], можно показать, что при фиксированных параметрах нижней структуры с нулем  $n$ -го порядка указанное условие может быть выполнено за счет выбора толщины нижнего металлического слоя верхней структуры с нулем  $n$ -го порядка (которая однозначно определяет ее остальные геометрические параметры) и толщины разделяющего диэлектрического слоя.

Таким образом, начиная с «одиночных» (трехслойных) МДМ-структур, имеющих нули отражения первого порядка, и последовательно комбинируя их, можно получить структуру, обладающую нулем произвольного заданного порядка по угловой частоте. Следует отметить, что практически идентичные рассуждения позволяют построить каскадную МДМ-структуру с нулем заданного порядка по тангенциальной компоненте волнового вектора падающей волны (пространственной частоте).

Как было отмечено выше, наличие нуля  $n$ -го порядка по угловой или пространственной частоте позволяет использовать соответствующую структуру для оптического вычисления  $n$ -й производной по времени огибающей падающего оптического импульса или  $n$ -й производной по пространственной координате профиля падающего оптического пучка. Продемонстрируем это на примере временного дифференцирования с помощью каскадной МДМ-структуры, имеющей нуль отражения третьего порядка и, следовательно, позволяющей вычислять третью производную от огибающей падающего импульса. Структура была рассчитана для нормального падения ТЕ-поляризованного электромагнитного импульса с центральной длиной волны в свободном пространстве 630 нм и состоит из чередующихся слоев золота (Au) и диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) (геометрия структуры схематично показана на рис. 1а). Толщины слоев структуры (перечислены сверху вниз) равны 16,9, 139,5, 24,8, 41,5, 26,1, 151,4, 35,1, 153,8, 26,4, 151,7, 35,8, 47,7, 37, 157,4, 200 нм.



а) Геометрия каскадной МДМ-структуры, имеющей нуль отражения третьего порядка по угловой частоте



б) Пример оптического вычисления производной по времени третьего порядка с помощью рассматриваемой каскадной МДМ-структуры: огибающая падающего гауссова импульса (точечная линия, правая вертикальная ось), абсолютная величина огибающей отраженного импульса (сплошная линия, левая вертикальная ось) и абсолютная величина аналитически вычисленной производной (пунктирная линия, левая вертикальная ось)

**Рис. 1.** Геометрия композитной МДМ-структуры, имеющей нуль отражения третьего порядка, (а) и пример оптического вычисления производной третьего порядка по времени (б)

На рис. 1б показан пример оптического вычисления производной третьего порядка по времени (сплошная линия, левая вертикальная ось) от огибающей падающего гауссова импульса (точечная линия, правая вертикальная ось). Для сравнения также показана аналитически вычисленная производная (пунктирная линия, левая вертикальная ось). Нормированное среднеквадратическое отклонение оптически вычисленной производной от аналитически рассчитанной (вычисленное без учета временного сдвига отраженного импульса, которое можно интерпретировать как время выполнения операции дифференцирования) составило лишь 1.55%, что говорит о высоком качестве дифференцирования.

### Благодарность

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00514).

### Список источников

- [1] **Zhou, Y.** Flat optics for image differentiation / Y. Zhou, H. Zheng, I. I. Kravchenko, J. Valentine // Nature Photonics. — 2020. — Vol. 14. — P. 316–323.
- [2] **Bykov, D. A.** Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, V. A. Soifer // Optics Letters. — 2011. — Vol. 36. — P. 3509–3511.

- [3] **Doskolovich, L. L.** Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L. L. Doskolovich, D. A. Bykov, E. A. Bezus, V. A. Soifer // *Optics Letters*. — 2014. — Vol. 39. — P. 1278–1281.
- [4] **Kashapov, A. I.** Spatial differentiation of optical beams using a resonant metal-dielectric-metal structure / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Journal of Optics*. — 2021. — Vol. 23. — 023501 (9pp).
- [5] **Li, L.** Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings / L. Li. // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1996. — Vol. 13. — P. 1024–1035.

## **Differentiation of optical signals using cascaded metal-dielectric-metal structures**

*E. A. Bezus<sup>1,2</sup>, A. I. Kashapov<sup>1,2</sup>, D. A. Bykov<sup>1,2</sup>, L. L. Doskolovich<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

We study optical properties of cascaded metal-dielectric-metal (MDM) structures constituted by several sequentially arranged three-layer MDM structures. We theoretically show that by “cascading” MDM structures having reflection zeros, one can obtain a zero of a required order in the reflection spectrum of the resulting structure. The presence of such a zero with respect to the angular or spatial frequency makes it possible to use such structures as optical differentiators computing derivatives of a required order of the profile of the incident optical signal with respect to time or a spatial variable. The presented numerical results confirm the possibility of the use of cascaded MDM structures as high-order optical differentiators. The obtained results may find application in analog optical computing and optical information processing systems.

*Keywords:* Nanophotonics, Differentiation of optical signals, Metal-dielectric-metal structures, Scattering matrix.

# Разработка алгоритма и программного обеспечения цифровой голографической интерферометрии

Н. А. Акбарова<sup>1</sup>, З. Т. Азаматов<sup>2</sup>, Д. Т. Якубов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ташкентский государственный технический университет им. И. А. Каримова, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение синтеза цифровой голографической интерферограмм, на основе метода двойного Фурье преобразования, которые реализованы в программной среде MatLab.

*Ключевые слова:* Цифровая голографическая интерферометрия, Голограмма, Интерферограммы, преобразование Фурье, Алгоритм, Программное обеспечение.

*Цитирование:* Акбарова, Н. А. Разработка алгоритма и программного обеспечения цифровой голографической интерферометрии / Н. А. Акбарова, З. Т. Азаматов, Д. Т. Якубов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 271–276.

## Введение

Одним из интенсивно развивающихся направлений современных информационных технологий является технология обработки цифровой видеоинформации, неограниченные возможности которой начали проявляться в связи с быстрым развитием сенсоров записи изображения – ПЗС матриц и КМОП-сенсоров с размерами пикселей 3–9 мкм, которые позволяют регистрировать изображение исследуемых объектов в широком временном (от фемтосекунд и выше) и спектральном (350–1100 нм) диапазонах. Это стимулировало развитие измерительных технологий, в частности, цифровой голографии (ЦГ). Развитие данной технологии требует разработки и реализации эффективных алгоритмов и программного обеспечения обработки цифровых голограмм. Для этого мы представляем алгоритмы и программное обеспечение записи цифровых голограмм и синтеза интерферограмм, на основе метода двойного Фурье-преобразования.

Запись цифровых голограмм впервые была предложена в [1], а числовая реконструкция была выполнена [2]. Полностью цифровая запись на ССД камеру голограмм Френеля и их численное восстановление было выполнено в [3]. Этот метод полностью заменил длительный процесс записи и восстановления голограмм с помощью фотопластинок и позволил с высокой точностью и скоростью проводить запись и восстановление голограмм. Важными этапами в развитие цифровой голографии стали этапы улучшения технологии записи и алгоритмов восстановления цифровых голограмм. Возникли различные технологии и алгоритмы реконструкции фазы. В осевой схеме записи цифровых голограмм требовалась процедура фазосдвигающих шагов для записи и восстановления отдельных голограмм [4] или общей голограммы [5]. Во вне осевой схеме записи [6] была продемонстрирована возможность измерений деформаций исследуемого объекта, сравнивая разницу фаз между его двумя состояниями. В тоже время эта технология двойной экспозиции не дает



информацию об абсолютной фазе объектной волны. Техника измерения абсолютной фазы была предложена в [7,8]. В этих работах было показано, что реконструкция фазы может быть выполнена из одной голограммы также как в классической голографии - подбором различных параметров. В [9] было показано, что эта технология имеет приложение в развивающейся цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ) [10-12], которая позволяет проводить неинвазивное исследование объектов. Технология ЦГИ основана на цифровой регистрации голограмм сформированных интерференцией опорного пучка и объектного пучка прошедшего через исследуемый образец. По сравнению с классической интерферометрией фазового сдвига, ЦГИ в терминах разрешения, точности, повторяемости, имеет два преимущества: скорость получения информации в виде комплексного волнового фронта – несколько мкс, что сокращает влияние вибраций; оригинальная цифровая процедура ЦГИ корректирует оптические аберрации.

Новые достижения получены в цифровой голографической томографии [13], оптической дифракционной томографии [14], цветной цифровой голографии [15], цифровой голографии с синтетической длиной волны [16] и различными технологиями компенсации аберраций [17]. Развились новые приложения ЦГ для анализа деформаций и анализа формы объекта [18], анализа траектории частиц [19], криптография [20], рефрактометрия [21], измерение вибраций [22], микрооптическое тестирование [23].

В настоящей работе представлен алгоритм записи цифровых голограмм и представлены исследования записи изображений.

Распределение интенсивности  $I(x,y)$  в плоскости записи голограммы  $(x,y)$  определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной  $O(x,y)$  и опорной  $R(x,y)$  волн, а именно

$$I(x,y) = |R(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + R(x,y) O^*(x,y) + R^*(x,y) O(x,y) \quad (1)$$

Для реконструкции (восстановления изображения объекта) цифровой голограммы, представляющей собой трехмерный массив данных  $A \times B \times D$ , где  $A \times B$  - размер приемного элемента в пикселах, а  $D$  - индекс дискретизации данных каждого пиксела, может быть использована компьютерная симуляция сходящегося опорного пучка, либо симуляция линзы, разделяющей изображения в фокальной плоскости. В цифровой интерпретации для достижения результата достаточно применить двумерное Фурье-преобразование к зарегистрированному массиву. После прямого Фурье преобразования массива получается Фурье спектр голограммы с четырьмя локализованными спектрами пространственных частот, которые соответствуют членам уравнения (1). Первые два члена (1) образуют нулевой порядок спектра, который локализован в центре двумерной Фурье плоскости. Третий и четвертый члены уравнения (1) образуют два сопряженных спектра, локализованных симметрично относительно центра и соответствуют комплексной амплитуде объектной волны. Таким образом, осуществление прямого преобразования Фурье позволяет выделять на полученном пространственном спектре наиболее информативную область. После выделения (фильтрования) одной из областей локализованного спектра и использования обратного Фурье преобразование можно получить распределение комплексной амплитуды  $A_i(x,y)$ . Проводя анализ этой комплексной амплитуды, можно восстановить фазовый фронт

объектной волны (реальный или сопряженный в зависимости от выбранной области фильтрации) в плоскости изображения объекта:

$$\phi(x, y, z_i) = \arctg \frac{\text{Im}[A_f(x, y, z_i)]}{\text{Re}[A_f(x, y, z_i)]} \quad (2)$$

здесь  $z_i$  обозначает, что фаза определяется на определенном расстоянии от голограммы.

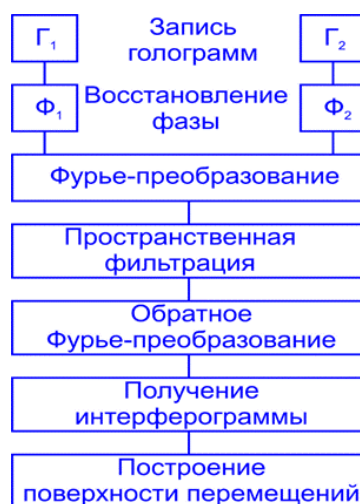


Рис. 1. Алгоритм, иллюстрирующий принцип работы

Были разработаны алгоритмы синтеза интерферограмм, на основе метода двойного Фурье преобразования. Две голограммы ( $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ) загружались в виде файлов изображений и представлялись в качестве массивов чисел. Загружаемые изображения голограмм могли иметь стандартный формат файлов изображений. Размеры двумерных массивов зависели от разрешения и размеров изображения. При этом разработанное программное обеспечение позволяло фильтровать и форматировать изображения голограмм с помощью стандартных программ обработки изображений. На схеме данный участок обозначен как  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Затем осуществлялась прямое двумерное преобразование Фурье. Полученный массив пространственного спектра мог индексироваться на экране компьютера в виде изображения. Была предусмотрена возможность выделения определенной области пространственного спектра для осуществления фильтрация пространственных частот. После проведения пространственной фильтрации производилось обратное двумерное преобразование Фурье. Затем проводилось выделение мнимой и действительной части полученного массива и восстановление фазы. Полученный массив воспроизводился на экране компьютера. При этом была предусмотрена возможность фильтрации и форматирования полученного изображения. Таким образом, синтезированные интерферограммы представлялись в виде двумерных массивов чисел, вывод которых на экран компьютера был возможен в виде изображений. Также была предусмотрена возможность сохранения маски фильтрации пространственных частот и синтезируемой интерферограммы.

Алгоритм синтеза интерферограмм был реализован в программной среде Matlab. Программное обеспечение (ПО) имело развитый графический интерфейс, дружественный к

пользователю. Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять следующие функции: цифровую реконструкцию голограммы (расчет комплексной амплитуды восстановленной объектной волны), запись восстановленных изображений в отдельные файлы; расчет распределения фаз в каждом из восстановленных изображений; получение распределения разности фаз  $\Delta\varphi$  для любой выбранной пары голограмм; проведение операции ликвидации разрывов (получение поля разности оптических фаз); графическое представление поля разности оптических фаз  $\Delta\varphi_{obj}(x, y)$ ; расчет поля перемещений в направлении вектора чувствительности интерферометра. Результаты обработки на каждом этапе отображаются на мониторе. Графическое представление результатов расчетов фазовых распределений производится как в варианте трехмерной, так и двумерной графики.

Разработанные программное обеспечение было написано в среде MatLab. Для динамического контроля производился захват изображения с цифровой камеры (ССД или веб-камеры). После захвата изображения с помощью Фурье преобразования строилось изображение в области пространственных частот. Существовала возможность последовательного выбора требуемый момент записи изображения. Также была предусмотрена автоматизация данного процесса на основе выбора определенного формата поля. После записи заданного количества цифровых массивов происходила их дальнейшая обработка. Загружаемые изображения голограмм могли иметь стандартный формат файлов изображений. При этом могли использоваться файлы с 8-ми или 16-ти битной градацией серых тонов. Размеры двумерных массивов зависели от разрешения и размеров изображения. При этом разработанные программные обеспечения позволяло фильтровать и форматировать изображения голограмм с помощью стандартных программ обработки изображений. Полученный массив пространственного спектра мог индцироваться на экране компьютера в виде изображения. Было предусмотрена возможность выделения определенной области пространственного спектра для осуществления фильтрации пространственных частот. После проведения пространственной фильтрации в ручном или автоматическом режимах производилась обратное двумерное преобразование Фурье. Затем производилось выделение мнимой и действительной части полученного массива и определение восстановления фазы. Таким образом, по анализу разности фаз, полученной при прямом и обратном двумерном дискретном преобразование Фурье и фильтрации изображения, проводилось построение интерференционной картины. Полученный массив воспроизводился на экране компьютера. При этом была предусмотрена возможность фильтрации и форматирование полученного изображения. Синтезированная последовательность интерферограмм представлялась в виде двумерных массивов чисел, вывод которых на экран компьютера был возможен в виде изображений. Программное обеспечение имело развитый графический интерфейс, дружелюбный к пользователю. Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет выполнять следующие функции:

- 1) динамический контроль записи изображений.
- 2) построение изображений в области пространственных частот для выбора определенной голограммы.
- 3) запись цифровых голограмм через определенные промежутки времени.

4) цифровую реконструкцию каждой голограммы и запись восстановленных изображений в отдельные файлы.

5) вычисление распределения разности фаз  $\Delta\varphi$  для любой выбранной пары голограмм, запись в файл.

6) уменьшение шумов и фильтрация изображений.

7) ликвидация фазовой неопределенности.

8) графическое определение поле разности оптических фаз  $\Delta\varphi_{obj}(x, y)$

9) расчет поля перемещений в направлении вектора чувствительности интерферометра.

10) реализация возможности останковки программы обработки на каждом из этапов, и выдача текущего результата обработки на печать.

11) графическое представление результатов расчетов фазовых распределений производится как в варианте трехмерной, так и двумерной графики с обеспечением отличия наложенной информации в уровнях серого или в цветовой гамме.

12) программное обеспечение в целом и отдельные его процедуры является дружеским к пользователю: имеются сервисные меню, обеспечивается простота выбора пользователем реализации как отдельной процедуры, так и их реализации в произвольных наборах или в желаемой последовательности, наглядность и эстетичность форм представления результатов.

13) помощью данного программного обеспечения проведены измерения смещений объектов. Показана возможность измерений на основе цифровой голографической интерферометрии с точностью до 0,05 нм при использовании излучения с длиной волны 1 мкм.

### Список источников

- [1] Goodman J. W., Lawrence R. W. Digital image formation from electronically detected holograms // Applied physics letters. – 1967. – Т. 11. – №. 3. – С. 77-79.
- [2] Kronrod M. A., Merzlyakov N. S., Yaroslavskii L. P. Reconstruction of a hologram with a computer // Soviet Physics Technical Physics. – 1972. – Т. 17. – С. 333.
- [3] Schnars U., Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction // Applied optics. – 1994. – Т. 33. – №. 2. – С. 179-181.
- [4] Mills G. A., Yamaguchi I. Effects of quantization in phase-shifting digital holography // Applied Optics. – 2005. – Т. 44. – №. 7. – С. 1216-1225.
- [5] Wyant J. C. Dynamic interferometry // Optics and photonics news. – 2003. – Т. 14. – №. 4. – С. 36-41.
- [6] Schnars U., Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction // Applied optics. – 1994. – Т. 33. – №. 2. – С. 179-181.
- [7] Cucho E., Bevilacqua F., Depeursinge C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging // Optics letters. – 1999. – Т. 24. – №. 5. – С. 291-293.
- [8] Liebling M., Blu T., Unser M. Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram // JOSA A. – 2004. – Т. 21. – №. 3. – С. 367-377.
- [9] Cucho E., Marquet P., Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms // Applied optics. – 1999. – Т. 38. – №. 34. – С. 6994-7001.

- [10] Dubois F. et al. Pattern recognition with a digital holographic microscope working in partially coherent illumination // *Applied optics*. – 2002. – T. 41. – №. 20. – C. 4108-4119.
- [11] Carl D. et al. Parameter-optimized digital holographic microscope for high-resolution living-cell analysis // *Applied optics*. – 2004. – T. 43. – №. 36. – C. 6536-6544.
- [12] Coppola G. et al. A digital holographic microscope for complete characterization of microelectromechanical systems // *Measurement Science and Technology*. – 2004. – T. 15. – №. 3. – C. 529.
- [13] Yu L., Kim M. K. Wavelength scanning digital interference holography for variable tomographic scanning // *Optics express*. – 2005. – T. 13. – №. 15. – C. 5621-5627.
- [14] Charrière F. et al. Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy // *Optics letters*. – 2006. – T. 31. – №. 2. – C. 178-180.
- [15] Javidi B. et al. Three-dimensional image fusion by use of multiwavelength digital holography // *Optics letters*. – 2005. – T. 30. – №. 2. – C. 144-146.
- [16] Stadelmaier A., Massig J. H. Compensation of lens aberrations in digital holography // *Optics letters*. – 2000. – T. 25. – №. 22. – C. 1630-1632.
- [17] Colomb T. et al. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation // *Applied optics*. – 2006. – T. 45. – №. 5. – C. 851-863.
- [18] Ma L. et al. Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement // *Journal of optics A: Pure and applied optics*. – 2004. – T. 6. – №. 4. – C. 396.
- [19] Müller J., Kebbel V., Jüptner W. Characterization of spatial particle distributions in a spray-forming process using digital holography // *Measurement Science and Technology*. – 2004. – T. 15. – №. 4. – C. 706.
- [20] Situ G., Zhang J. Multiple-image encryption by wavelength multiplexing // *Optics letters*. – 2005. – T. 30. – №. 11. – C. 1306-1308.
- [21] Sebesta M., Gustafsson M. Object characterization with refractometric digital Fourier holography // *Optics letters*. – 2005. – T. 30. – №. 5. – C. 471-473.
- [22] Borza D. N. Mechanical vibration measurement by high-resolution time-averaged digital holography // *Measurement Science and Technology*. – 2005. – T. 16. – №. 9. – C. 1853.
- [23] Colomb T. et al. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation // *Applied optics*. – 2006. – T. 45. – №. 5. – C. 851-863.

## **Development of the software for digital holographic interferometry**

*N. A. Akbarova, Z. T. Azamatov, D. T. Yakubov*

Tashkent state technical university, Tashkent, Uzbekistan

Algorithms and software for the synthesis of digital holographic interferograms based on the double Fourier transform method, which are implemented in the MatLab software environment, have been developed.

*Keywords:* Fourier transforms, Hologram, Digital holographic interferometry.

# Об аппроксимации передаточной характеристики схемы голографии Фурье

А. О. Гаугель, А. В. Павлов

Университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

В рамках задачи аналитического описания отклика схемы голографии Фурье показана возможность аппроксимации реальных передаточных характеристик гауссово-подобными функциями. Даны модель и оценки погрешностей аппроксимации применительно к обработке изображений со степенными пространственно-частотными спектрами амплитуд для разных условий записи голограмм. Правомочность подхода подтверждена сравнением с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* Оптика, Голография, Дифракционная эффективность, Передаточная функция, Импульсный отклик системы.

*Цитирование:* Гаугель, А. О. Об аппроксимации передаточной характеристики схемы голографии Фурье / А. О. Гаугель, А. В. Павлов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 277–284.

## Введение

При описании 4f схемы голографии Фурье в качестве передаточной характеристики  $H(\nu)$  используется измеряемая в требуемом порядке дифракции (в статье – в +1-м) зависимость по интенсивности локальной дифракционной эффективности  $\eta(\nu)$  голограммы от пространственной частоты  $\nu$

$$H^p(\nu) = \eta(\nu) = \hat{H}^p S(\nu), \quad (1)$$

где верхний индекс  $p$  указывает порядок дифракции, в котором проводятся измерения,  $S(\nu)$  – пространственно-частотный спектр мощности эталонного образа, использованного для записи голограммы, а  $\hat{H}$  – оператор голографической регистрирующей среды (ГРС), учитывающий условия записи голограммы и экспозиционные характеристики ГРС (ЭХ ГРС).

Вместо импульсного отклика из практических соображений часто используется автокорреляционная функция (АКФ) записанного на голограмме эталона, формируемая в +1 порядке дифракции в выходной плоскости Out при освещении голограммы эталонным спектром  $S(\nu)$  (предъявлении во входной плоскости In эталонного образа) и связанная с передаточной характеристикой для +1-го порядка дифракции (1) преобразованием Фурье

$$R(\zeta) = \hat{F} H^{+1}(\nu), \quad (2)$$

где  $\zeta$  – координата в задней фокальной плоскости второй фурье-преобразующей линзы L2 – выходной плоскости схемы Out,  $\hat{F}$  – оператор преобразования Фурье. АКФ представляет собой дифракционно-ограниченное изображение точечного опорного источника, использованного при записи голограммы, т.е. функцию размытия точки.

Для реальной информации характерны пространственно-частотные спектры мощности, со степенным спадом [2-4]. Применительно к схеме голографии Фурье (рис.1), передаточная характеристика (1) при степенных спектрах эталонных образов, записанных на голограмме, в ограниченном частотном диапазоне, определяемым динамическим диапазоном ЭХ ГРС, часто может быть аппроксимирована экспоненциальными функциями, поскольку:

- а) тракты ввода информации суть дополнительные низкочастотные фильтры (НЧФ) [1];
- б) пространственное ограничение размера обрабатываемых образов апертурой кадрового окна ведет к ослаблению нулевых и низкочастотных компонент спектра – сглаживанию максимума записанного спектра относительно эталонного в низкочастотном диапазоне;
- в) ЭХ ГРС обуславливают дополнительную полосовую фильтрацию на [4-10];
- г) дополнительная фильтрация обусловлена также и форм-фактором голограммы [11], особо актуальным именно для голограмм Фурье [4, 8-10].

Привлекательна аппроксимация передаточных характеристик функциями Гаусса, но реальные спектры характеризуются показателем степени аргумента (пространственной частоты), отличным от 2, вследствие чего Гауссова модель в общем случае дает неадекватное описание передаточной характеристики и АКФ схемы. Поиску удобной и адекватной модели аппроксимации отклика  $4f$  схемы посвящен ряд статей [4,8-10]. Но усложнение задач, решаемых методом голографии Фурье [14-22] актуализирует вопрос адекватной, наглядной и вычислительно незатратной аппроксимации.

В докладе показаны возможности и ограничения аппроксимации передаточной характеристики и корреляционного отклика схемы голографии Фурье гауссово-подобной моделью в предположении записи голограммы при равенстве или превышении амплитудой опорного пучка локальной амплитуды пучка эталонного на нулевой пространственной частоте. Подход позволяет найти компромиссное решение дилеммы адекватность – наглядность аналитической модели и снизить требования к вычислительной мощности процессора в случае компьютерной реализации за счет использования аналитической модели.

### 1. Подход и модель аппроксимации

Представим передаточную характеристику схемы, т.е. записанный на голограмме эталонный спектр мощности  $S(v)$  со степенным спадом, экспоненциальной моделью

$$H(v) = \exp \left[ -\ln(\alpha) \cdot \left( \frac{-v}{v_\alpha} \right)^D \right], \quad (3)$$

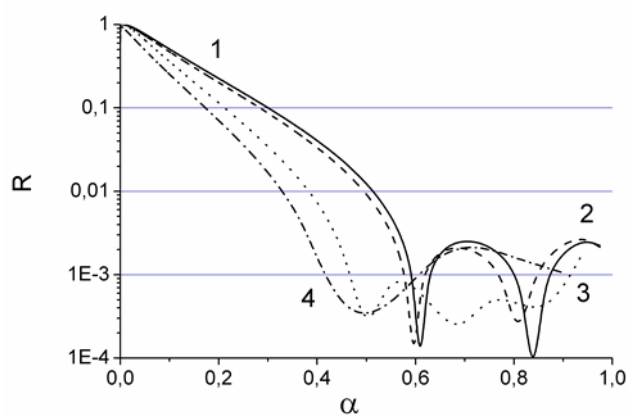
где  $v$  — пространственная частота,  $\eta(v)$  — зависимость локальной дифракционной эффективности голограммы (ДЭ) от пространственной частоты,  $D$  — показатель степени,  $v_\alpha$  — параметр модели — частота, измеряемая по уровню  $\alpha = \frac{H(v_\alpha)}{H(0)} = \frac{\eta(v_\alpha)}{\eta(0)}$ , т. е. определяемому как отношение значения передаточной характеристики (локальной ДЭ голограммы) на данной

частоте  $\nu_\alpha$  к её максимальному значению (в рамках подхода – на нулевой частоте). Удобство этой модели в том, что параметр  $\nu_\alpha$  не изменяется при изменении показателя степени  $D$ , а при  $\alpha = 0,606$  и  $D = 2$  имеем Гауссову модель. Для простоты и наглядности далее рассмотрим частный вариант уровня  $\alpha = 0,606$ , т.е.

$$H(\nu) = \exp\left(\frac{-\nu^D}{2\nu_{0,606}^D}\right), \quad (4)$$

где  $\nu_{0,606}$  – параметр, равный частоте, на которой локальная дифракционная эффективность голограммы  $\eta(\nu) = \exp(0,5) = 0,606$  от её максимального значения  $\eta(0)$ .

На рис.1 показаны зависимости модуля относительной погрешности аппроксимации (3).



**Рис. 1.** Зависимости модуля относительной погрешности  $R$  аппроксимации моделью (4) от уровня спектра  $\alpha$ : 1 – степенного спектра мощности  $S(\nu) = \nu^{-2,6}$ ; 2 – с учетом НЧФ; 3 – с учетом сигмоидальной ЭХ ГРС, ФФ, и НЧФ ( $D=1,07$ ,  $\nu_{0,606}=6,57$ ); 4 – с учетом сигмоидальной ЭХ ГРС, ФФ, и НЧФ ( $D=1,01$ ,  $\nu_{0,606}=5,551$ )

Из рис. 2 видно, что с ростом показателя степени  $D$  погрешность аппроксимации уменьшается, а подбор параметров модели аппроксимации, физически обусловленных режимом записи голограммы и её обработки, включая ЭХ ГРС, позволяет оптимизировать относительную погрешность в требуемом диапазоне интенсивностей спектра (локальной дифракционной эффективности голограммы  $\eta(\nu)$  – передаточной характеристики схемы), связанном с диапазоном пространственных частот. Для аналоговых методов обработки традиционно считается допустимой относительная погрешность не более 0,1, этот уровень превышает только в высокочастотной области – экспоненциальная модель (4) дает заниженные сравнительно со степенной значения на высоких частотах.

Корреляционный отклик схемы рис.1, как фурье-образ функции (4), описывается аналогичным выражением только при  $D=2$ , то есть только для функции Гаусса  $G(\nu)$ . Примем для АКФ, т.е. фурье-образа функции (4), также гауссово-подобную модель аппроксимации

$$R(\zeta) = \hat{F}H^+(\nu) = \hat{F}\exp\left(\frac{-\nu^D}{2\nu_{0,606}^D}\right) \approx \exp\left(\frac{-\zeta^{d(D)}}{2\left(\zeta_{0,606}(D, \nu_{0,606})\right)^{d(D)}}\right), \quad (4)$$



где  $d(D)$  – показатель степени, зависящий от показателя степени  $D$  в модели спектра (4), а параметр  $\zeta_{0,606}(D, \nu_{0,606})$  аппроксимируем выражением  $\zeta_{0,606}(D, \nu_{0,606}) = \text{Kp}(D) \cdot \gamma$ , где  $\text{Kp}(D) = \frac{\zeta_{0,606}(D, \nu_{0,606})}{\gamma}$  – функциональный коэффициент, задающий связь параметра  $\zeta_{0,606}(D, \nu_{0,606})$  для произвольного показателя степени аргумента  $D$  с параметром  $\gamma$  фурье-образа функции Гаусса.

Функциональный коэффициент  $\text{Kp}(D)$  был получен численно, для этого построено семейство зависимостей отношения параметров  $\zeta_{0,606}/\gamma$  для ряда значений показателя степени  $D$  в диапазоне  $D \in [0,5, 4]$  и диапазона значений параметра спектра амплитуд (4)  $\nu_{0,606} \in [1, 100]$  пикселей при длине реализации спектра  $N = 2^{18} = 262144$ . Значения  $N$  и диапазона параметра спектра  $\nu_{0,606}$  были выбраны из соображений обеспечения точности численного моделирования корреляционного отклика.

Были рассмотрены три модели аппроксимации, предварительно выбранные из соображений визуального сходства графического представления моделей с расчетными данными: сигмоидальная

$$\text{Kp}_s(D) = a_s \left( 1 - \exp(-b_s (D - c_s))^{e_s} \right), \quad (5)$$

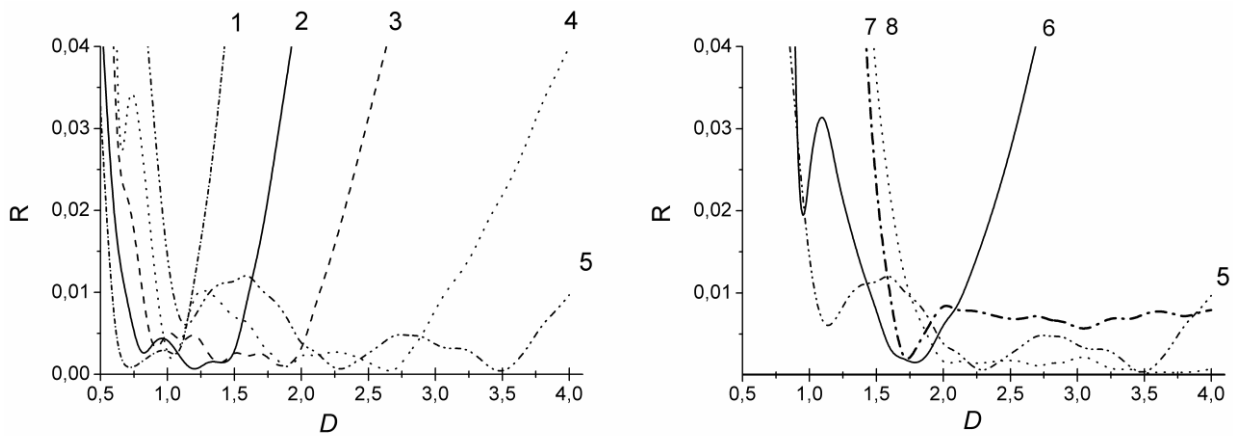
логарифмическая (хорошее визуальное соответствие в диапазоне  $D \in [1,0, 2,0]$ )

$$\text{Kp}_m(D) = (\ln(D + a_m))^{c_m} + b_m, \quad (6)$$

и гиперболическая (хорошее визуальное соответствие в диапазоне  $D > 2,0$ )

$$\text{Kp}_{hyp}(D) = 1,6 \left( 1 - \frac{1}{D} \right) + a_{hyp}, \quad (7)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $e$  – параметры, буквенные индексы при них указывают на модель. Подбор параметров проводился по критерию минимума среднего квадрата отклонения (СКО) значения аппроксимации результатов численных экспериментов. На рис.2.а и 2.б даны относительные погрешности аппроксимации коэффициента  $\text{Kp}$  этими моделями.



а) Относительная погрешность аппроксимации коэффициента  $K_r$  логарифмической моделью

б) Относительная погрешность аппроксимации коэффициента  $K_r$  гиперболической моделью

**Рис. 2.** Зависимости относительной погрешности  $R$  аппроксимации коэффициента  $K_r(D)$  от показателя степени  $D$ : 1 – модель (5) для диапазона  $[0,5, 1,0]$ ; 2 – модель (5) для диапазона  $[0,5, 1,5]$ ; 3 – модель (5) для диапазона  $[0,5, 2,0]$ ; 4 – модель (5) для диапазона  $[0,5, 3,0]$ ; 5 – модель (5) для диапазона  $[0,5, 4,0]$ ; 6 – модель (6) для диапазона  $[1,0, 2,0]$ ; 7 – модель (7) для диапазона  $[2,0, 3,0]$ ; 8 – модель (7) для диапазона  $[3,0, 4,0]$

Нахождение зависимости  $K_d(D)$  проведено по критерию минимума СКО модели аппроксимации (6) от фактического корреляционного отклика в диапазоне значений  $\zeta \in [0, \zeta_{\max}]$ , где  $\zeta_{\max}$  определялась по трем критериям:

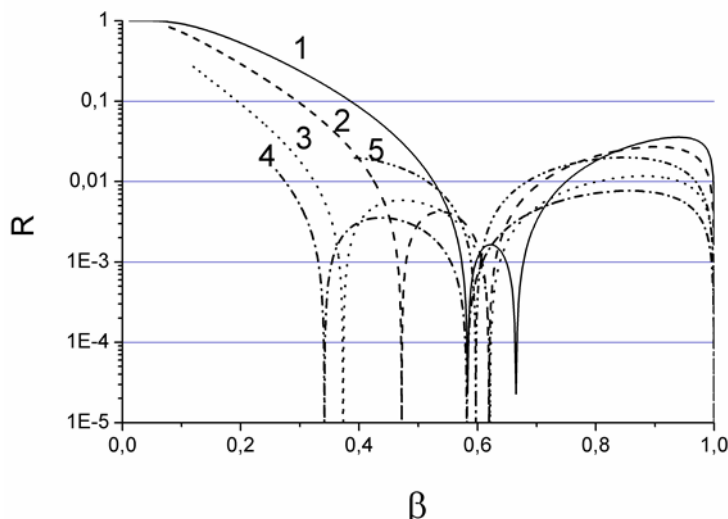
- а) представления 99,5% энергии спектра применительно к  $D=2$  [1];
- б) динамическому диапазону измерения и, соответственно, аппроксимации АКФ 1 порядок;
- в) динамическому диапазону измерения АКФ 2 порядка.

Полученные в численных экспериментах зависимости  $K_d(D)$  были аппроксимирована моделью

$$K_d(D) = A - B_1 \left( 1 - \exp\left(\frac{-D}{C_1}\right) \right) - B_2 \left( 1 - \exp\left(\frac{-D}{C_2}\right) \right), \quad (8)$$

где  $A, B_1, B_2, C_1$  и  $C_2$  – параметры.

На рисунке 3 в полулогарифмическом масштабе приведены относительные погрешности аппроксимации формы глобального максимума АКФ (ГМ АКФ) для варианта а), где  $\beta = R(\zeta)/R(0)$  – относительная амплитуда. Для б) и в) зависимости имели аналогичный вид, но с расширением диапазона аппроксимации относительная погрешность в целом возрастала.



**Рис. 3.** Относительные погрешности аппроксимации формы ГМ АКФ при выборе диапазона аппроксимации из условия представления 99,5% энергии спектра применительно к  $D=2$ :  
 1 –  $D=0,5$ ; 2 –  $D=1,0$ ; 3 –  $D=1,5$ ; 4 –  $D=2,5$ ; 5 –  $D=4,0$

### Заключение

Таким образом, применительно обработке схемой голографии Фурье изображений со степенными спектрами передаточная характеристика и автокорреляционная функция схемы могут быть остью аппроксимированы гауссово-подобной моделью. Экспоненциальные модели спектров характеризуются существенным по сравнению со степенными снижением удельного веса высокочастотных компонент, но на практике этот фактор в значительной степени нивелируется как низкочастотной фильтрацией в трактах ввода информации, так и нелинейностью экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред, ведущей к ограниченности частотного диапазона передаточной характеристики. В ряде случаев ограничение частотного диапазона необходимо уже из условий задачи, например, для обеспечения требуемого отношения сигнал/помеха при корреляционном сравнении изображений [12]. Подбор параметров модели аппроксимации позволяет оптимизировать модель для требуемого частотного диапазона.

### Список источников

- [1] М.М. Мирошников. *Теоретические основы оптико-электронных приборов*. Л. Машиностроение. 1977. 600 с., с ил.
- [2] А.М. Яглом *Корреляционная теория стационарных случайных функций*. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 С.
- [3] А.Е. Алтынов, В.В. Грузинов, И.В. Мишин. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, (1)2017, 34. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_28341894\\_68655679.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_28341894_68655679.pdf)
- [4] А.М. Кулешов, Е.И. Шубников, С.А. Смаева. *Опт. и спектр.*, **60** (6), 1273 (1986). [A.M. Kuleshov, E.I. Shubnikov, S.A. Smaeva. *Opt. Spectr.*, **60** (6), 791 (1986).]
- [5] В.А. Барачевский. *Опт. и спектр.*, **124** (3), 371 (2018). [V.A. Barachevsky. *Opt. Spectr.*, **124** (3), 373 (2018).] DOI: 10.21883/OS.2018.03.45659.238-17

- [6] Л.П. Амосова, Н.И. Плетнева, А.Н. Чайка. Оптический журнал, **72**(6), 57 (2005). [Amosova, L.P., Pletneva, N.I., Chaika, A.N. Journal of Optical Technology, **72**(6), 469 (2005).] DOI: 10.1364/JOT.72.000469
- [7] Л.П. Амосова, А.Н. Чайка. Письма в ЖТФ, **33**(6), 57 (2007). URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/11855> [Amosova, L.P., Chaika, A.N. Technical Physics Letters, **33**(6), 255 (2007).] DOI: 10.1134/S1063785007030200
- [8] Е.И. Шубников, А.М. Кулешов, Опт. и спектр., **55** (1), 161 (1983). [E.I. Shubnikov A.M. Kuleshov. Opt. Spectr., **55** (1), 94 (1983).]
- [9] А.М. Кулешов, Е.И. Шубников. Опт. и спектр., **60** (3), 606 (1986). [A.M. Kuleshov, E.I. Shubnikov. Opt. Spectr., **60** (3), 369 (1986).]
- [10] С.А. Александрина, А.М. Кулешов. Опт. и спектр., **68** (3), 652 (1990).
- [11] С.А. Шойдин, М.С. Ковалев. Опт. и спектр., **128** (7), 885 (2020). [S.A. Shoydin, M.S. Kovalev. Opt. Spectr., **128** (7), 885 (2020).] DOI: 10.21883/OS.2020.07.49557.108-20
- [12] Е.И. Шубников. Опт. и спектр., **62** (2), 450 (1987). [E.I. Shubnikov. Opt. Spectr., **62** (2), 268 (1987).]
- [13] А.В. Павлов. Опт. и спектр., **78** (1), 152 (1995). [Pavlov A.V. Opt. Spectr., **78** (1), 135 (1995).]
- [14] В.В. Орлов. Кв. электр., **47** (8), 773 (2017). [Orlov V.V. Quantum Elrctronics, **47** (8), 773 (2017).] DOI: 10.1070/QEL16337.
- [15] А.В. Павлов, В.В. Орлов. Кв. электр., **49** (3), 246 (2019). [Pavlov A.V., Orlov V.V. Quantum Elrctronics, **49** (3), 246 (2019).] DOI: 10.1070/QEL16748.
- [16] П.А. Ручка, Н.М. Вереникина, И.В. Гриценко, Е.Ю. Злоказов, М.С. Ковалев, Г.К. Красин, С.Б. Одинок, Н.Г. Сцепуро. Опт. и спектр., **127** (4), 563 (2019). [P. A. Ruchka, N. M. Verenikina, I. V. Gritsenko, E. Yu. Zlokazov, M. S. Kovalev, G. K. Krasin, S. B. Odinokov & N. G. Stsepuro Opt. Spectr., **127**, 618 (2019).] DOI: 10.21883/OS.2019.10.48358.172-19.
- [17] M.S. Kovalev, G.K. Krasin, S. B. Odinokov, A.B. Solomashenko, E.Yu. Zlokazov. Optics Express, **27** (2), 1563 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.001563.
- [18] Е.Ю. Злоказов. Кв. электр., **50** (7), 643 (2020). [E.Yu. Zlokazov. Quantum Elrctronics, **50** (7), 643 (2020).] ] DOI: 10.1070/QEL17291.
- [19] Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, В.В. Краснов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков, П.А. Черемхин. // Кв. электр., **50** (7), 667 (2020). [N.N. Evtikhiev, E.Yu. Zlokazov, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, R.S. Starikov, P.A. Cherekhin. Quantum Electronics, **50** (7), 667 (2020)] DOI: 10.1070/QEL17295.
- [20] S. Rothe, P. Daferner, S. Heide, D. Krause, F. Schmieder, N. Koukourakis, J. W. Czarske. Optics Express, **29** (23), 37602 (2021). DOI: 10.1364/OE.434842.
- [21] Mager H.J., Wess O., Waidelich W. Opt. Comm., **9**(2), 156 (1973). DOI: 10.1016/0030-4018(73)90248-4.
- [22] А.В. Павлов. Компьютерная оптика, **44**(5), 728 (2020). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668.

## Approximation of the transfer characteristic of the Fourier holography scheme

*A. O. Gaugel, A. V. Pavlov*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Within the framework of the problem of analytical description of the response of the Fourier holography scheme, the possibility of approximating real transfer characteristics by Gaussian-like functions is shown. A model and estimates of approximation errors are given for processing images

with power-law spatial-frequency amplitude spectra for different recording conditions of holograms. The validity of the approach is confirmed by comparison with experimental data.

*Keywords:* Optics, Holography, Diffraction efficiency, Transfer function, System impulse response.

# Формирование вращающихся и произвольно трансформирующихся световых полей для повышения защитных свойств голограмм

А. А. Свинцов<sup>1</sup>, Ч. Б. Кайтуков<sup>2</sup>, С. И. Зайцев<sup>1</sup>, А. В. Яновский<sup>2</sup>, Д. С. Копёнкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники РАН, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> АО «Научно-технический центр «Атлас», Москва, Россия

Представлен новый оптический элемент для аппаратного контроля подлинности защитных знаков. Для наблюдения эффекта необходимо использовать специальный визуализатор скрытого изображения. При освещении оптического элемента лазерным источником, по мере удаления экрана наблюдения от поверхности вдоль оси отраженного пучка возникает непрерывно вращающееся изображение. Другим вариантом может быть высвечивание и погасание различных изображений при смещении экрана вдоль оси отражённого пучка. Изготовлен защитный элемент, демонстрирующий оба защитных признака одновременно. Рассчитанные рельефно-фазовые элементы могут быть синтезированы с помощью технологии имидж матрикс (дот матрикс) или электронно – лучевой технологии. Такие защитные элементы предназначены для использования при инструментальном контроле подлинности оптических защитных знаков.

*Ключевые слова:* Компьютерная голография, Дифракционные защитные элементы.

*Цитирование:* Свинцов, А. А. Формирование вращающихся и произвольно трансформирующихся световых полей для повышения защитных свойств голограмм / А. А. Свинцов, Ч. Б. Кайтуков, С. И. Зайцев, А. В. Яновский, Д. С. Копёнкин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 285–288.

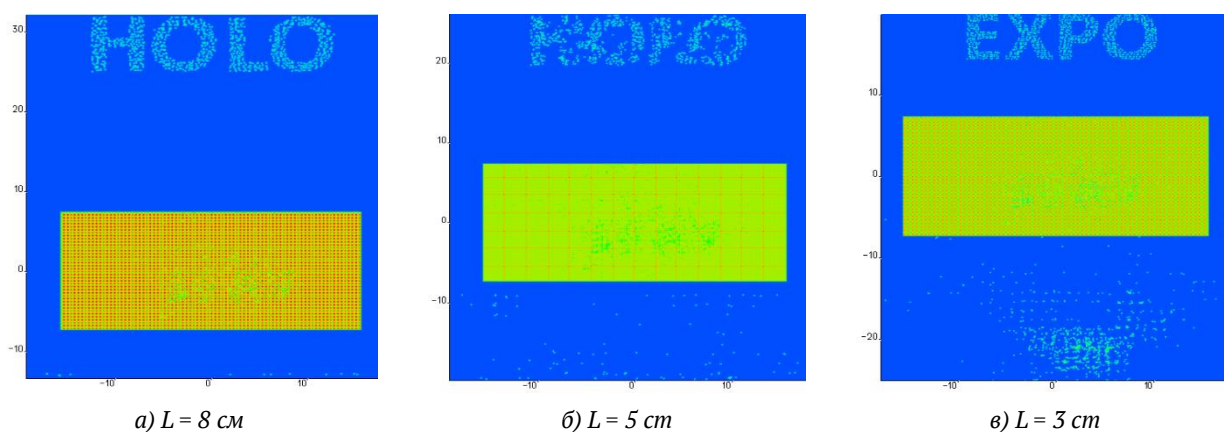
Для усиления стойкости защитных оптических знаков необходимо, практически непрерывно, разрабатывать и вносить в продукцию новые элементы защиты. Такие элементы могут удовлетворять разным требованиям в зависимости от того, на какой способ идентификации подлинности они рассчитаны. Это может быть визуальный, инструментальный, или экспертный контроль. После появления научных работ, раскрывающих способы синтеза дифракционных оптических элементов (ДОЭ), формирующих спиральные пучки [1], возникла идея использовать этот эффект в защитных оптических элементах. Визуально спиральный пучок демонстрирует вращение исходного изображения при удалении экрана от ДОЭ вдоль оси распространения пучка при неизменном положении источника освещения. Предложенный в работе математический аппарат из-за его сложности и те ограничения, которые накладываются на исходные изображения не позволили напрямую использовать готовые решения в производственном процессе.

Для решения поставленной задачи был принят дискретный подход в расчёте ДОЭ для формирования спиральных пучков. Логически пучок рассматривается как совокупность лучей, распространяющихся от фазовой поверхности ДОЭ не коллинеарно вдоль выбранного направления. Сам ДОЭ так же представляет собой дискретные области, расчёт фазовой

поверхности каждой из которых осуществляется отдельно и последовательно одна за другой. Такой подход не ограничивает размер рассчитываемого ДОЭ. Так же отсутствуют ограничения на передаваемое изображение. Возможен расчёт ДОЭ для полутоновых (gray scale) изображений.

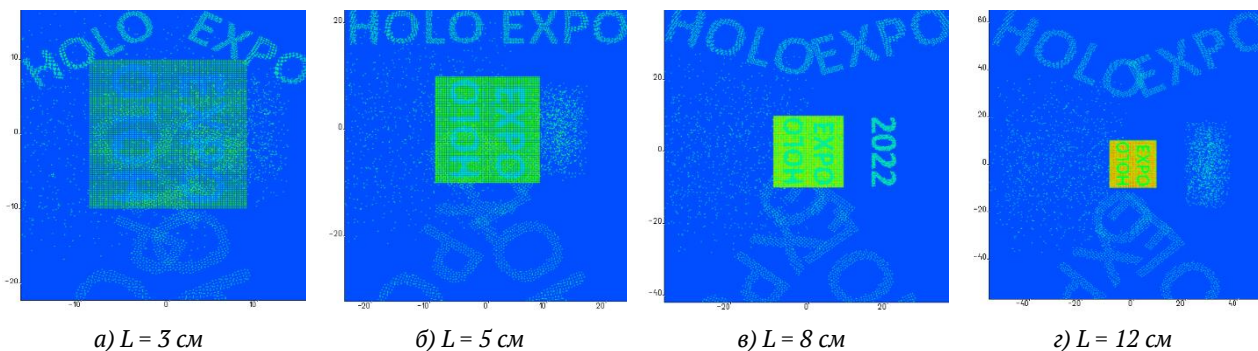
В той же логике расчёта можно заменить вращение пучка света и, как следствие, изображения, на плавную трансформацию между несколькими произвольно выбранными изображениями. Вторым вариантом рассчитанного ДОЭ может быть фокусировка и расфокусировка нескольких изображений, находящихся в одном и том же месте считывающего экрана при смещении экрана вдоль оси отражённого пучка. В описанном варианте смена изображений происходит не резко. На некотором расстоянии при подходе к оптимальной дистанции наблюдения и отходе от неё скрытое изображение может быть распознано и, в случае буквенной кодировки может быть прочитано. Вопрос глубины резкости скрытых изображений связан с площадью рассчитанного ДОЭ, точнее с его линейными размерами.

На Рис.1 представлен результат моделирования ДОЭ. Расчёт произведён для двух изображений «НОЛО» и «EXPO», восстанавливаемых на разных расстояниях.



**Рис. 1.** Результат моделирования распределения интенсивности в пучке на различных расстояниях  $L$  от ДОЭ

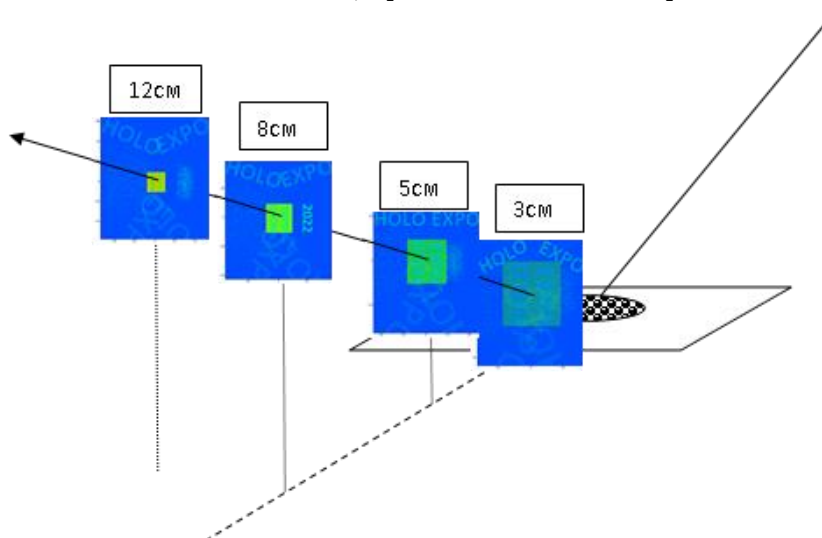
Дискретный подход в расчёте позволяет соединить оба описанных выше оптических эффекта в одном оптическом защитном элементе. На Рис. 2 представлены результаты моделирования распределения интенсивности пучка света для рассчитанного ДОЭ на разных расстояниях вдоль оси распространения. Рассчитанный элемент содержит три изображения: два изображения поворачиваются в противоположных направлениях, это “половинки” «НОЛО» и «EXPO», которые на расстоянии 5 см дают слитную, ровную надпись “НОЛОEXPO” и еще одно изображение «2022», которое возникает (собирается, фокусируется) только на расстоянии 8 см и исчезает (размывается) на других расстояниях.



**Рис. 2.** Результат моделирования распределения интенсивности в спиральном пучке на различных расстояниях  $L$  от ДОЭ

На Рис. 3 представлена оптическая схема восстановления скрытых изображений комбинированного ДОЭ, расположение освещающего и восстановленного пучков.

Информационная ёмкость поверхности защитных оптических знаков позволяет размещать ДОЭ спирального пучка как на выделенном сплошном участке фазовой поверхности, так и распределять по всей поверхности защитного оптического знака, скрытно, вместе с визуальными элементами дизайна, практически без потери качества последних.



**Рис. 3.** Схема восстановления скрытых изображений ДОЭ

Таким образом представлен новый оптический защитный элемент для аппаратного контроля подлинности защитных знаков. Для наблюдения эффекта необходимо использовать специальный визуализатор скрытого изображения. При освещении оптического элемента лазерным источником излучения, по мере удаления экрана наблюдения от поверхности вдоль оси отраженного пучка, возникает непрерывно вращающееся либо трансформирующееся изображение. Рассчитанные рельефно-фазовые элементы могут быть синтезированы с помощью технологии имидж матрикс (дот матрикс) или электронно-лучевой технологии. Такие защитные элементы предназначены для использования при инструментальном контроле подлинности оптических защитных знаков.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Волостников В.Г. Методы анализа и синтеза когерентных волновых полей // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.

## Forming of rotating and randomly transforming light fields to enhance the protective properties of holograms.

*C. B. Kaytukov<sup>1</sup>, S. I. Zaitsev<sup>2</sup>, A. A. Svintsov<sup>2</sup>, A. V. Yanovsky<sup>1</sup>, D. S. Kopenkin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> JSC «Scientific & Technical Center «Atlas», Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of microelectronics technologies RAS, Chernogolovka, Russia

A new optical element for hardware verification of the authenticity of optical security signs is presented. To observe the effect, it is necessary to use a special visualize for hidden images. When an optical element is illuminated by a laser source, as the observation screen moves away from the surface along the axis of the reflected beam, a continuously rotating image appears. Another option may be the flashing and fading of various images when the screen is shifted along the axis of the reflected beam. A secure optical element has been manufactured that demonstrates both protective features at the same time. The calculated relief-phase elements can be synthesized using image matrix technology (dot matrix) or electron beam technology. Such protective elements are intended for use in instrumental verification of the authenticity of optical protective signs.

*Keywords:* Digital holography, Diffractive security elements.

# Комбинированный защитный элемент на основе распределённого Брэгговского отражателя и рельефно-фазовой голограммы

*А. В. Раздобарин, Л. И. Смирнов*

АО «НПО «КРИПТЕН» Дубна, Россия

Представлен новый оптический защитный элемент, представляющий собой комбинацию Брэгговского отражателя и голографического изображения. В зависимости от конфигурации отражателя данный элемент может иметь высокие коэффициенты отражения в широком или узком оптическом спектре, а также обладать цветопеременным эффектом как в отраженном, так и в проходящем свете. На основе результатов моделирования структуры комбинированного защитного элемента, состоящего из распределённого Брэгговского отражателя и голографического изображения изготовлены экспериментальные образцы.

*Ключевые слова:* Голография, Защитный элемент, Цветопеременный эффект, Брэгговский отражатель.

*Цитирование:* **Раздобарин, А. В.** Комбинированный защитный элемент на основе распределённого Брэгговского отражателя и рельефно-фазовой голограммы / А. В. Раздобарин, Л. И. Смирнов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 289–294.

## Введение

Актуальность работы определяется интенсивно растущим интересом к защитным оптическим элементам, которые можно наблюдать не вооруженным глазом. В последние годы такой интерес был обусловлен технологической сложностью изготовления и невозможностью их воспроизведения при отсутствии специального оборудования.

Практическая ценность работы заключается в изготовлении голографических прозрачных цветопеременных защитных элементов с отражающим покрытием, обладающим высоким коэффициентом отражения, а также меняющим цвет отражения и пропускания при наклоне.

Предлагаемое в данной работе решение по изготовлению прозрачных защитных элементов с отражающим покрытием основано на базе четверть волнового зеркала (распределённый Брэгговский отражатель) в комбинации с голографическим защитным изображением.

Целью данной работы являлось: изготовление прозрачных цветопеременных голографических образцов, где в качестве зеркала использовался распределённый Брэгговский отражатель и рельефно-фазовая голограмма; оценка оптических свойств изделия (яркости, цветов отражения и пропускания).

При моделировании структуры комбинированного защитного элемента использовался распределённый Брэгговский отражатель (РБО), также известный как одномерный фотонный

кристалл, чаще всего представляющий собой последовательность двух или более осажденных друг на друга материалов с разными показателями преломления, как показано на рис. 1.

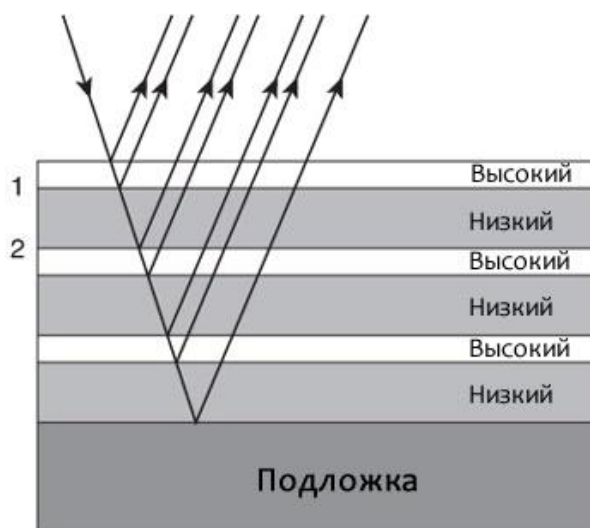


Рис. 1. Структура РБО

Электромагнитная волна, распространяясь перпендикулярно слоям РБО, приведённого на рис. 1, испытывает отражения от границ раздела сред с показателями преломления  $n_H$  и  $n_L$ . Закон Брэгга определяет условия, при которых волны, отражённые от границ раздела сред данного РБО при перпендикулярно падающей волне, находятся в одинаковой фазе [1]:

$$\Lambda = \frac{l\lambda_b}{2n_{eff}} \quad (1)$$

где  $\Lambda$  – период РБО,  $l = 1, 2, 3, \dots$  целое число, указывающее на порядок дифракции,  $\lambda_b$  – длина волны,  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления РБО.

$$n_{eff} = 2 \left( \frac{1}{n_H} + \frac{1}{n_L} \right)^{-1} \quad (2)$$

Электромагнитная волна, распространяясь перпендикулярно слоям РБО, испытывает отражения от границ раздела сред с показателями преломления  $n_H$  и  $n_L$ . Условие Брэгга – Вульфа определяет условия, при которых волны, отражённые от границ раздела сред данного РБО при перпендикулярно падающей волне, находятся в одинаковой фазе [2].

Так, для РБО, изображённого на рис. 1, толщины слоев с большим показателем преломления  $n_H$  и с меньшим показателем преломления  $n_L$  рассчитывается соответственно, как:

$$t_H = \frac{\lambda}{4n_H} \quad (3)$$

$$t_L = \frac{\lambda}{4n_L} \quad (4)$$

Тогда, коэффициент отражения РБО на длине волны  $\lambda_b$  будет равен [3]:

$$|r| = \left( \frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}}{1 + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}} \right)^2 \quad (5)$$

где  $m$  – число пар четвертьволновых слоев, из которых состоит РБО.

Максимум коэффициента отражения РБО в спектре приходится на длину волны  $\lambda_b$ , и его спектральная ширина определяется из выражения:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_b \Delta n}{\pi n_{eff}} \quad (6)$$

где  $\Delta n$  – разница показателей преломления  $n_H$  и  $n_L$ ,  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления РБО.

На границе между слоями с разными показателями преломления падающий пучок отражается. Отраженные части имеют сдвиг по фазе в  $180^\circ$  в том случае, если свет перешел из слоя с меньшим показателем преломления  $n_L$  в слой с большим коэффициентом преломления  $n_H$ . Относительная разность фаз всех отраженных лучей либо нулевая, либо кратна полному обороту в  $360^\circ$  – тогда наблюдается явление интерференции (см. рис. 1) [4].

Для адаптации такого рода конструкции к имеющимся технологическим возможностям предприятия был произведен расчет и оценка ожидаемых эффектов.

В опытных образцах в качестве материала с высоким коэффициентом преломления был использован ZnS (сульфид цинка), а в качестве материала с низким  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (криолит) (см. рис. 2).

Расчетные спектры показывали, что возможно создание зеркала состоящего из трех слоев ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  100 нм между ZnS 44 нм) с коэффициентом отражения 73 % в верхнем экстремуме на длине волны 450 нм. При этом увеличение толщины  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  приводило к смещению оптического резонанса и возможности получить различные интерференционные цвета отражения зеркала, а также цветопеременные покрытия, работающие как на просвет, так и на отражение.

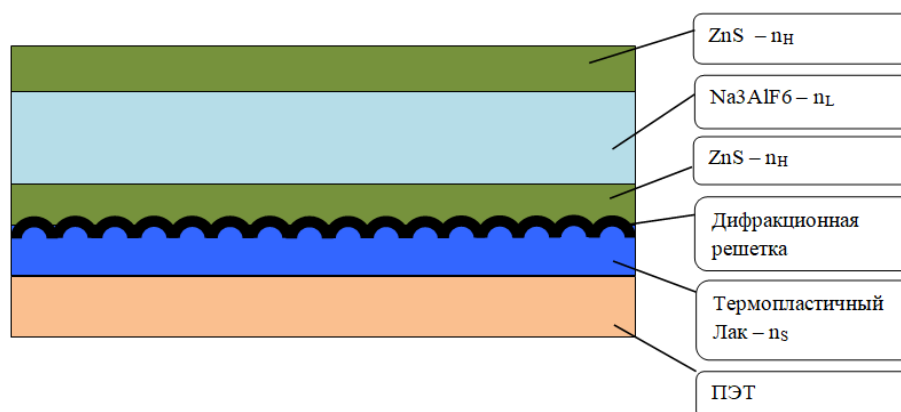


Рис. 2. Конструкция изделия

В качестве подложки использовался ПЭТ с нанесенным термопластичным лаком, по которому производилось тиснение никелевой матрицей с рельефно–фазовой голограммой. Затем последовательно, путем терморезистивного распыления в вакууме, наносились слои Брэгговского отражателя: ZnS (сульфид цинка),  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (криолит) и ZnS (сульфид цинка). С помощью спектрометра в реальном времени контролировался спектр отражения покрытия.

Полученные оптические элементы имели помимо голографического изображения высокий коэффициент отражения (63 % отражения при оптической плотности 0,3 OD), а также такие защитные признаки как: изменение цвета отражения при наклоне (из пурпурного в зеленый), изменение цвета пропускания при наклоне (из зеленого в красный), различающиеся цвета при отражении и пропускании (отражение пурпурный, на просвет зеленый).



**Рис. 3.** Цвет отражения образцов



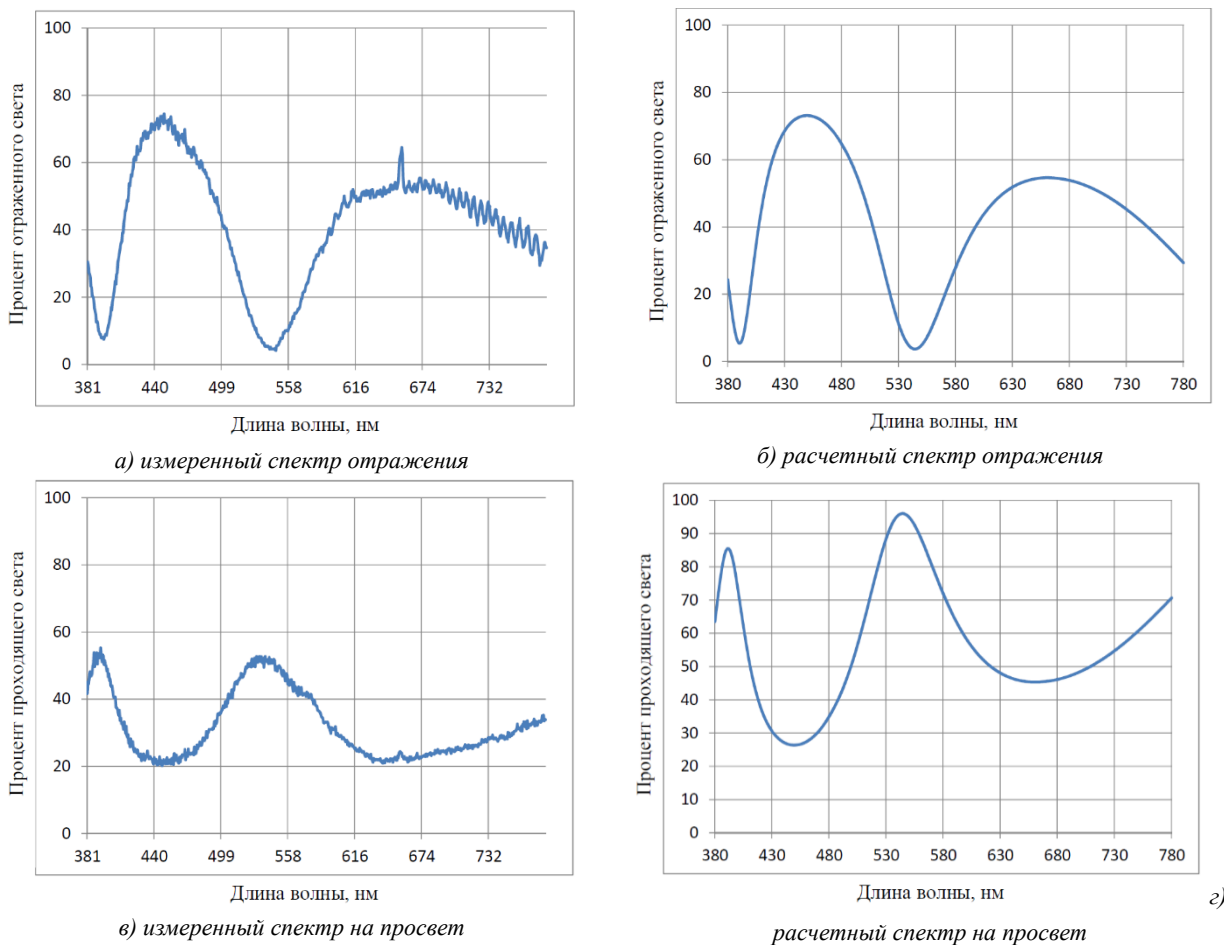
**Рис. 4.** Цвет отражения при наклоне образцов



**Рис. 5.** Цвет образцов на просвет

Расчетные и фактически измеренные спектры на отражение и на просвет, на примере образца №7, приведены ниже на рис. 6.

Цвет отражения и пропускания меняется в зависимости от толщины нанесения слоев. Сводные данные приведены в таблице 1 ниже.



**Рис. 6.** Расчетные и фактически измеренные спектры образца №7

**Таблица 1.** Сводные данные физических величин по образцам

Номер образца	Отражение R, %	Оптическая плотность OD	Физическая толщина Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Цвет отражения	Цвет на просвет	Цветопеременный эффект
1	62	0,30	110 нм	серебристый	фиолетовый	серебристый прозрачный
2	60	0,31	120 нм	серебристый	фиолетовый	серебристый прозрачный
3	не измерялось	не измерялось	140 нм	желтый	синий	желтый серебристый
4	не измерялось	не измерялось	190 нм	фиолетовый	зеленый	фиолетовый желтый
5	не измерялось	не измерялось	220 нм	синий	оранжевый	синий фиолетовый
6	не измерялось	не измерялось	280 нм	сине-зеленый	красный	синий фиолетовый
7	не измерялось	не измерялось	420 нм	Красно-розовый	зеленый	розовый зеленый

### Заключение

В работе предложен способ расчета и изготовления оптических защитных элементов. Показано что, в зависимости от конфигурации отражателя данные элементы могут демонстрировать высокие коэффициенты отражения в широком или узком оптическом

спектре, а также обладать цветопеременным эффектом, как в отраженном, так и в проходящем свете.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Yariv, A.** Periodic structures for integrated optics / A. Yariv, M. Nakamura // IEEE Quantum Electronics. – 1977 – Vol. 13. – № 4. – P. 233–253.
- [2] **Манцызов, Б. И.** Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1999. – 208 с.
- [3] **Wilmsen, C.** Vertical-cavity surface-emitting lasers / C. Wilmsen, H. Temkin, and L.A. Coldren // Cambridge Studies in Modern Optics. – 1999. – P.73.
- [4] **Окатов, М.А.** Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгожин и др.; Под ред. М.А. Окатова – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

## A combined protective element based on a distributed Bragg reflector and a relief-phase hologram

*A. V. Razdobarin, L. I. Smirnov*

JSC RPC KRYPTEN, Dubna, Russia

A new optical security element is presented, which is a combination of a Bragg reflector and a holographic image. Depending on the configuration of the reflector, this element can have high reflection coefficients in a wide or narrow optical spectrum, as well as have a color-changing effect in both reflected and transmitted light. Based on the results of modeling the structure, samples consisting of a distributed Bragg reflector and a holographic image were produced.

*Keywords:* Holography, Security element, Color-shifting effect, Bragg reflector.

# Методы струйной печати для формирования оптических наноструктур

*А. В. Виноградов, Т. Н. Погосян*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Стремительное развитие струйной печати, достоинствами которой являются экономичность, скорость и масштабируемость, дает возможность для разработки перспективных оптических структур и элементов. Метод струйной печати заключается в покапельном нанесении чернил объемом несколько пиколитров на неограниченный набор подложек. В качестве чернил выступают коллоидные суспензии и растворы, которые обладают различными магнитными и электрооптическими свойствами, а для получения оптических наноструктур используют такие механизмы, как самосборка или кристаллизация из прекурсоров *in situ*. В докладе будут приведены примеры струйной печати различных видов голограмм и оптических наноструктур: в частности, радужных, зеркальных, фазовых и опаловых голограмм, а также примеры печати планарных волноводов и создания высокорефрактивных и низкорефрактивных дисперсий.

*Ключевые слова:* Струйная печать, Наноструктуры, Фотоника, Растворная химия.

*Цитирование:* Виноградов, А. В. Методы струйной печати для формирования оптических наноструктур / А. В. Виноградов, Т. Н. Погосян // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 295–298.

## Введение

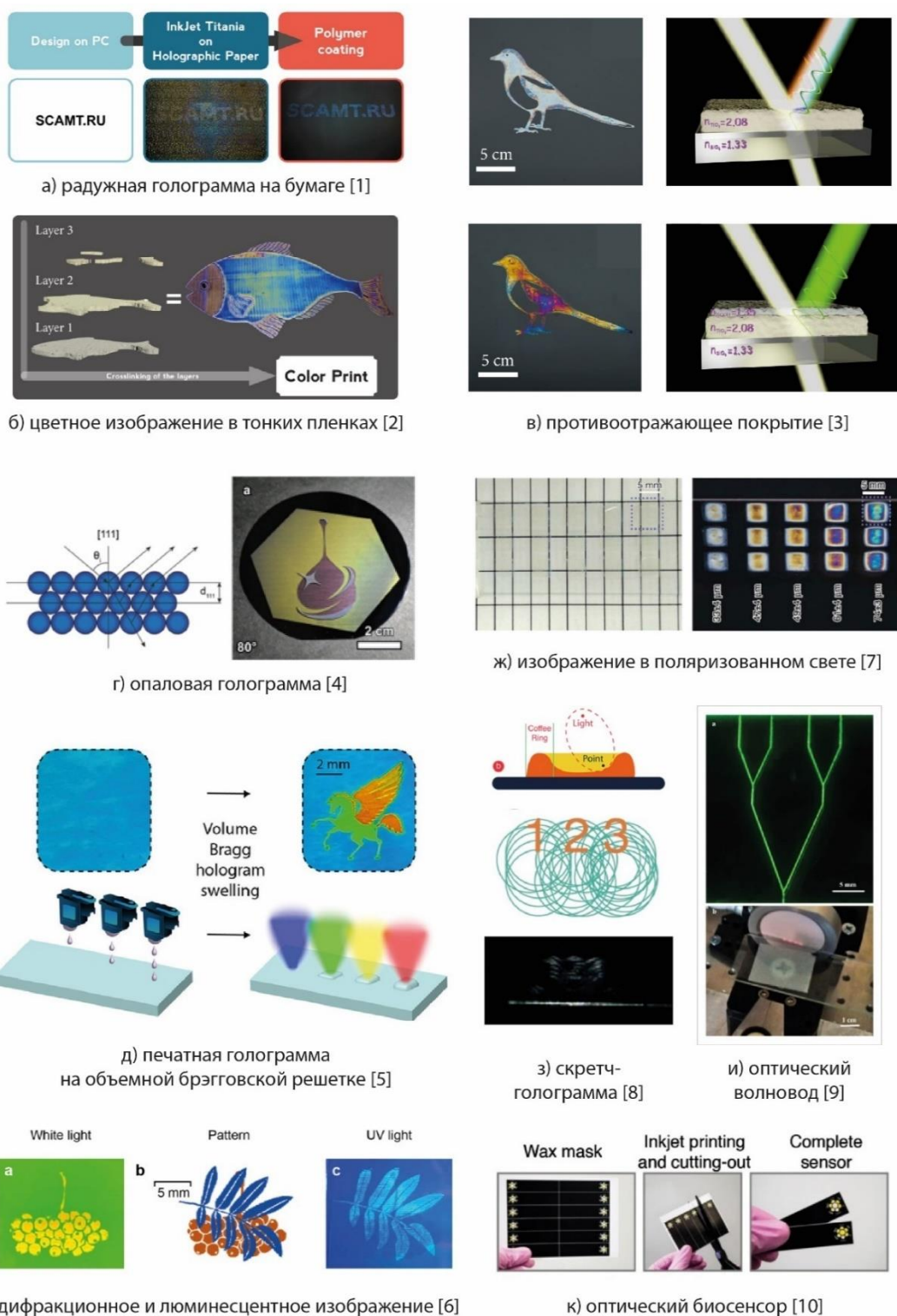
Струйная печать — это время и ресурсоэффективная аддитивная технология, демонстрирующая перспективы создания оптических структур и элементов для разных областей применения. Разностороннее использование методов струйной печати при создании оптических структур достигается не только за счет параметров печати, но и за счет специфических свойств чернил и подложек.

## Методы струйной печати

Чернила на основе наночастиц диоксида титана крайне перспективны и многофункциональны за счет своих уникальных свойств. Их нанесение на бумагу с микротеснением на основе полиэтилентерефталата с помощью офисного струйного принтера, с последующим покрытием прозрачным полимером, обеспечивает оптический эффект избирательного сохранения голографического тиснения, как показано на рис. 1а [1]. Чернила на основе диоксида титана нашли применение и в печати многоцветного изображения за счет дифракции в тонких пленках [2]. Согласно рис. 1б послойная печать позволяет точно контролировать толщину полученного слоя паттерна и, соответственно, цвет изображения. Для превышения видимости изображения было использовано покрытие на основе бёмита [3]. Нанесение противоотражающего слоя уменьшает «фоновое» отражение и, следовательно, улучшает эффективную видимость целевого луча (рис. 1в).



Струйная печать голограмм является перспективным методом изготовления устройств защиты от подделок. Работа [4] демонстрирует метод получения многоцветной опаловой голограммы с использованием фотонных коллоидных кристаллов.



**Рис. 1.** Примеры печати оптических структур для различного применения

Цветопередача изображения зависит от диаметра полистирольных сфер, входящих в состав чернил, а не от пигмента, что препятствует копированию (рис. 1г). Другие беспигментные чернила на основе фотоотверждаемых мономеров используются в работе [5].

Они вызывают набухание голографической подложки, что приводит к изменению условий дифракции и к изменению цвета изображения, как показано на рис 1д. В последствии полученное изображение было дополнено люминесцентным паттерном (рис. 1е), видимым в УФ излучении [6]. Для его получения использовались чернила с прекурсором перовскитов. Еще один тип бесpigментных чернил основан на анизотропных нанокристаллах целлюлозы [7]. Как показано на рис. 1ж, изображение становится видным только в поляризованном свете, что так же переключается с применением такого типа изображение с идеей защиты от контрафакта.

Струйная печать позволяет получить не только тонкие пленки. Эффект «кофейного кольца» в струйной печати вызван капиллярными течениями при высыхании капли и некоторое время считался нежелательным. Однако он показал себя превосходным механизмом при создании скретч-голограмм [8]. Оптический принцип такой голограммы основан на эффектах блеска с искривленной поверхности. Используя эффект кофейного кольца и чернил на основе диоксида титана, печатают вогнутую структуру с ярким бликом (рис 1з). Паттерн такой голограммы рассчитывается на компьютере. Печатные образцы имеют высокую видимость, простоту применения и воспроизведения.

Помимо печати изображений с оптическими эффектами другим перспективным направлением струйной печати являются волноводы. В работе [9] представлена струйная печать оптических волноводов, предназначенных для одномодовой работы в ИК диапазоне (рис 1и). В качестве чернил используются чернила с наночастицами диоксида титана, а в качестве подложки – кварцевое стекло без предварительной обработки. Струйная печать так же используется для печати биосенсоров. В работе [10] демонстрируется определение концентрации ферментов глюкозы и холестерина путем обнаружения перекиси водорода, получения окисления субстрата ферментами оксидазы. Диоксид титана может быть использован для обнаружения перекиси водорода. Как показано на рис. 1к она реагирует с четырехвалентным титаном, содержащимся в чувствительном слое биосенсора, с образованием продукта желтого цвета.

### **Заключение**

Данная работа демонстрирует разностороннее применение метода струйной печати путем тонкого варьирования состава чернил, параметров печати и типа подложки. В результате получены голографические изображения на основе разных оптических эффектов, волноводы и даже биосенсоры с визуальным окрашиванием.

### **Благодарность**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-79-10202).

### **Список источников**

- [1] **Yakovlev, A. V.** Sol-gel assisted inkjet hologram patterning / A. V. Yakovlev, V. A. Milichko, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov // *Advanced Functional Materials*. – 2015. — Vol 25. — № 47. — P. 7375-7380.

- [2] **Yakovlev, A. V.** Inkjet Color Printing by Interference Nanostructures / A. V. Yakovlev, V. A. Milichko, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov // *ACS Nano*. – 2016. – Vol 10. – № 3. – P. 3078-3086.
- [3] **Yakovlev, A. V.** Inkjet printing of TiO<sub>2</sub>/AlOOH heterostructures for the formation of interference color images with high optical visibility / A. V. Yakovlev, V. A. Milichko, E. A. Pidko, V. V. Vinogradov, A. V. Vinogradov // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol 6. – P. 37090.
- [4] **Keller, K.** Inkjet Printing of Multicolor Daylight Visible Opal Holography / K. Keller, A. V. Yakovlev, E. V. Grachova, A. V. Vinogradov // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Vol 28. – P. 1706903.
- [5] **Pogolian, T.** Inkjet assisted patterning of Bragg grating towards multiple color imaging / T. Pogolian, T. Statsenko, A. Mukhtudinova, M. Masharin, D. Bugakova, A. Sergienko, S. Makarov, A. Vinogradov // *Applied Materials Today*. – 2022. – Vol 26. – P. 101289.
- [6] **Smirnov, A.** Structural color image augmented by inkjet printed perovskite patterning / A. Smirnov, T. Pogolian, L. Zelenkov, S. Butonova, S. Makarov, A. Vinogradov // *Applied Materials Today*. – 2022. – Vol 28. – P. 101545.
- [7] **Eremeeva, E.** Printing of Colorful Cellulose Nanocrystalline Patterns Visible in Linearly Polarized Light / E. Eremeeva, E. Sergeeva, V. Neterebskaia, S. Morozova, D. Kolchanov, M. Morozov, I. Chernyshov, V. Milichko, A. Vinogradov // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2020. – Vol 12. – № 40. – C. 45145-45154.
- [8] **Slabov, V.** Inkjet printing of specular holograms based on a coffee-ring effect concave structure / V. Slabov, A. V. Vinogradov, A. V. Yakovlev // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2018. – Vol 6. – P. 5269-5277.
- [7] **Klestova, A.** Inkjet Printing of Optical Waveguides for Single-Mode Operation / A. Klestova, N. Cheplagin, K. Keller, V. Slabov, G. Zaretskaya, A. V. Vinogradov // *Advanced Optical Materials*. – 2019. – Vol 7. – № 2. – P. 1801113.
- [8] **Safaryan, S. M.** Inkjet printing of the chromogen free oxidase based optical biosensors / S. M. Safaryan, A. V. Yakovlev, A. V. Vinogradov, V. V. Vinogradov // *Sensors and Actuators B*. – 2017. – Vol 251. – P. 746–752.

## Inkjet printing methods for developing optical nanostructures

*A. V. Vinogradov, T. N. Pogolian*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The rapid development of inkjet printing, the advantages of which are cost-effectiveness, speed and scalability, provides an opportunity for the development of promising optical structures and elements. The inkjet printing method consists of dropping a few picolitres of ink onto an unlimited set of substrates. The inks are colloidal suspensions and solutions that have various magnetic and electro-optical properties, and mechanisms such as self-assembly or crystallization from precursors in situ are used to produce optical nanostructures. The presentation will include examples of inkjet printing of various types of holograms and optical nanostructures: in particular, rainbow, mirror, phase and opal holograms, as well as examples of printing planar waveguides and creating high-refractive and low-refractive dispersions.

*Keywords:* Inkjet printing, Nanostructures, Photonics, Solution chemistry

## Особенности ультрафиолетовой рекомбинации голограмм

*А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин*

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

В докладе описан пример технологии рекомбинации рельефных голографических изображений и приведены фото и видео работы промышленного образца рекомбинатора. Проведено сравнение характеристик механических и УФ рекомбинаторов. Рассмотрены оптические и технологические свойства используемых фотополимеров. Приведены микрофотографии краевых эффектов и результаты измерения профилей полос.

*Ключевые слова:* Оптика, голография, фотополимер, УФ отверждение.

*Цитирование:* **Смык, А. Ф.** Особенности ультрафиолетовой рекомбинации голограмм / А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 299–302.

Рекомбинация (мультипликация) голограмм служит для размещения на технологической матрице многих идентичных голографических изображений. Одиночное изображение записывается довольно долго (обычно - часы или десятки часов), и представляется разумным не записывать его многократно, а просто воспроизвести рельеф нужное количество раз в нужных местах на матрице, добавив, например, метки вырубки и метки тайминга.

Такие устройства используются в голографическом производстве повсеместно и, обычно, это механические рекомбинаторы, переносящие рельеф с никелевой на пластиковую пластину при нагреве и большом давлении. У них есть ограничения по размеру единичного оттиска и много чисто технологических проблем, связанных с высоким давлением и нагревом – деформация пластиковой пластины, образование «ножей» на краях оттиска, вырывы при крутом рельефе. Как следствие, единичный оттиск обычно не превосходит размером 50x50 мм, его форма не может быть сложной.

Этих недостатков лишены УФ-рекомбинаторы, осуществляющие перенос рельефа на УФ-отверждаемый фотополимер без большого давления и температуры. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики механического рекомбинатора R-1200 и УФ-рекомбинаторов UVR-2000 и UVR-A3.

**Таблица 1.** Сравнение характеристик рекомбинаторов

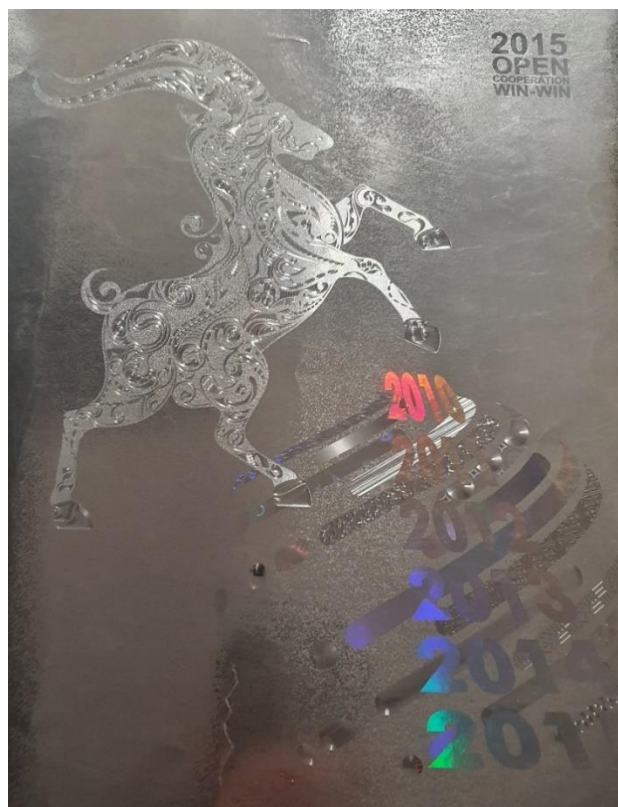
	<b>R-1200</b>	<b>UVR-2000</b>	<b>UVR-A3</b>
Макс. размер оттиска	50×50 мм	300×400 мм	80×80 мм
Макс размер матрицы	800×1200 мм	1000×2000 мм	290×420 мм
Габариты	2500×1800×1600 мм	2440×1860×1500 мм	600×600×800 мм
Вес	2500 кг	1500 кг	40 кг
Энергопотребление	4 кВт	2 кВт	1 кВт
Краевые эффекты	400-500 мкм	20 мкм	20 мкм
Точность стыковки изображений	—	200 мкм	20 мкм
Усилие прижима	20 т	20 кг	10 кг

УФ рекомбинаторы имеют еще два существенных преимущества над механическими:

- они позволяют довольно точно стыковать изображения с разных матриц со сложным контуром на одной матрице, например, встроить сосредоточенное изображение в обойный рисунок.

- они намного точнее воспроизводят асимметричные и специальные рельефы [1]. Если в голограммах, использующих дифракционные порядки форма профиля не так важна, то в голограммах нулевого порядка она имеет ключевое значение, поскольку меняет форму блика [2].

На Рис. 1 представлена фото рекомбинированной голограммы, состоящей из нескольких радужных и литографических изображений, совмещенных на лито-фоне. Размер изображения по горизонтали – 300 мм.



**Рис.1.** Фото составного УФ-рекомбинированного изображения.

Совмещение сложных контуров осуществляется на УФ рекомбинаторах, работающих по методу наложения изображений (UVR-2000), осуществляется с точностью около 200 мкм. На рекомбинаторах с точной засветкой (UVR-A3) – с точностью 20 мкм.

На Рис. 2 представлена микрофотография стыка контуров двух изображений, выполненных методом наложения. На Рис. 3 — методом точной засветки.

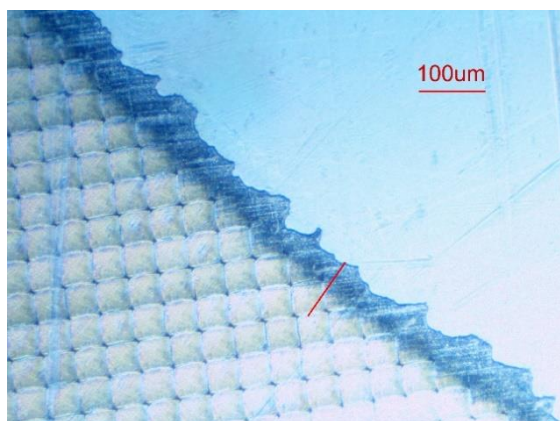


Рис. 2. Наложение

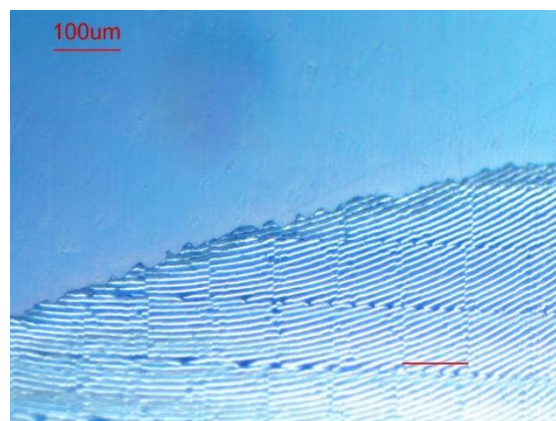


Рис. 3. Точная засветка

Особое значение для качества УФ-рекомбинации имеют свойства используемого фотополимера: спектральный диапазон отверждения, чувствительность, усадка, механические свойства. В Таблице 2. приведены некоторые характеристики современных фотополимеров, используемых для воспроизведения рельефов. Из большого количества доступных фотополимеров для анализа нами подбирались лучшие по оптическим и механическим свойствам, разрешению и чувствительности.

Таблица 2. Характеристики фотополимеров

	Спектр, нм	Чувствительность, мДж/см <sup>2</sup>	Усадка, %	Твердость по Шору
KOR-365	365	150	12	70
e-res PLA	365-410	15	8	82D
Eryone-st	395-405	9	10	80
Jung-He	395-410	24	12	60
A-tech	405	20	6	50

Все эти полимеры применимы для рекомбинации, однако, если фотополимер еще и не растворяет фоторезист, то появляется дополнительное технологическое преимущество УФ рекомбинации — отказ от изготовления одиночного никелевого мастера. Рельеф для УФ рекомбинации можно снимать прямо с фоторезиста, не металлизировав фоторезист и не изготавливая никелевую реплику. Помимо экономии времени и затрат это снижает деградацию рельефа и возможность появления дефектов от пыли. А если используется УФ прокаточная машина, то гальванопластика вообще исчезает из технологической цепочки. Надо сказать, что гальваника, хоть и незначительно, но загрязняет среду за счет выноса из ванн небольшого

количества электролита при ополаскивании оправок, мастеров и рабочих матриц. Во многих странах это создает проблемы при размещении производства. Так, Статья 87 «Закона Китайской Народной Республики о предотвращении и борьбе с загрязнением почвы» предусматривает штраф не менее 100 000 юаней (около 900 т.р.) и конфискацию доходов за превышение норм содержания солей металлов в стоках.

Таким образом, использование УФ-отверждаемых материалов в голографических технологиях соответствует современным техническим и технологическим тенденциям, позволяет поднять качество финального продукта и уменьшить временные и финансовые затраты.

### **Список источников**

- [1] А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин. Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах // Мир техники кино. — 2018. — №1(12). — С. 23–30.
- [2] С.Б. Одинокоев, А.Ф. Смык, А.В. Шурыгин. Формирование динамических и бинокулярных объемных изображений в защитных голограммах с нулевым порядком дифракции. // Автометрия. — 2020. — Т. 56. — № 2. — С. 55–61.

## **UV holographic recombination. Technical aspects.**

*A. Smyk, A. Shurygin*

James River Branch LLC, Moscow, Russia

The presentation describes UV hologram recombination technology and industrial recombining machine. Mechanical and UV recombiners are compared as well as UV curable resins for surface relief reproduction.

*Keywords:* Optics, holography, photopolymer, UV relief reproduction.

# Защита ценных изделий, документов или голограмм магнитными микроструктурными образованиями

А. С. Кузнецов<sup>1</sup>, М. В. Волкова<sup>1</sup>, А. П. Губарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «НПП «ВИЧЕЛ», Москва, Россия

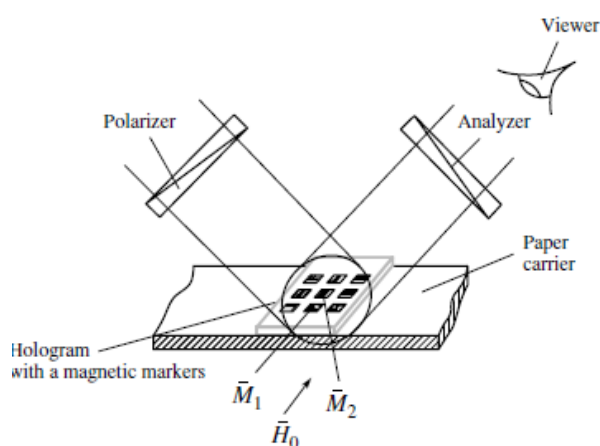
Предложен защитный элемент на основе магнитных микроструктурных образований, предназначенный для защиты ценных документов, в том числе голограмм. Защитный элемент сформирован комбинацией магнитных частиц с различной коэрцитивной силой и размерами. Использование слабых перемагничивающих плоскостных магнитных полей и визуализации на основе эффекта Фарадея с помощью магнитооптических висмут содержащих феррит-гранатовых структур, позволит обеспечить возможность контролировать характерные динамические защитные эффекты.

*Ключевые слова:* Защитная голограмма, Магнитооптика, Магнитооптический эффект Фарадея, Защита документов.

*Цитирование:* Кузнецов, А. С. Защита ценных изделий, документов или голограмм магнитными микроструктурными образованиями / А. С. Кузнецов, М. В. Волкова, А. П. Губарев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 303–305.

Повышение эффективности защиты ценных изделий и голограмм от подделки, а также исключение ошибок при проверке подлинности длительно используемых изделий является актуальной задачей.

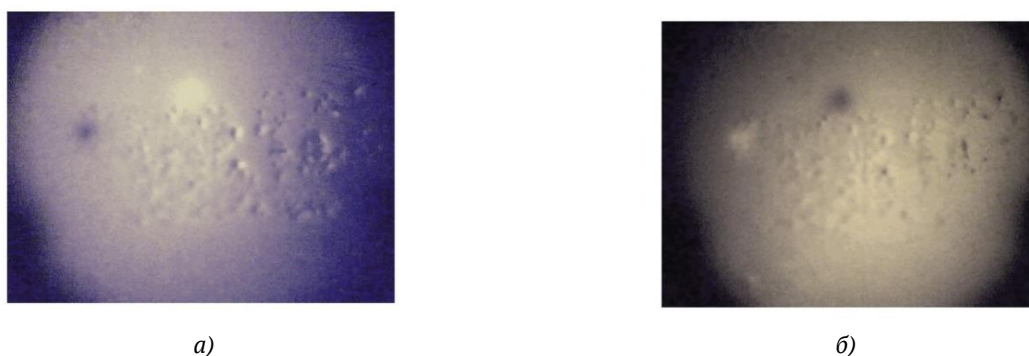
В работе [1] авторами был предложен способ формирования в магнитных материалах текстурированного изображения, полученное путем локального воздействия внешнего магнитного поля и последующей визуализации этих изображений на основе магнитооптического эффекта Керра (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема наблюдения скрытого магнитного изображения при приложении определенно-ориентированного внешнего магнитного поля  $H_0$  [1]



В данной работе предлагается новый способ защиты документов, который заключается в формировании скрытого микроструктурного образования. При этом скрытое магнитное микроструктурное образование может состоять как из магнитных частиц определенного материала (магнитомягкого или магнитотвердого), так и из их комбинации (аморфных магнитомягких и магнитотвердых материалов), и при этом может располагаться в приповерхностных слоях защищаемого изделия в хаотичном или регулярном расположении [2, 3]. Использование слабых перемагничивающих плоскостных магнитных полей и метода визуализации процессов перемагничивания магнитных частиц на основе эффекта Фарадея с помощью магнитооптических висмут содержащих феррит-гранатовых структур, позволит обеспечить возможность контролировать характерные динамические защитные эффекты. На рис. 2 приведены фотографии магнитооптических изображений одного микроструктурного образования, состоящего из хаотично расположенных магнито жестких и аморфных магнитомягких частиц, сделанные в моменты, когда на них воздействовали плоскостными магнитными полями различного направления (наблюдается эффект «моргания» изображения). Данные эффекты повысят достоверность результатов проверок на подлинность защищаемых изделий.



**Рис. 2.** Изображение магнито жестких частиц и аморфного магнитомягкого материала: а) при приложенном плоскостном магнитном поле  $H = 0,5 \text{ Э}$ ; б) при поле  $H = -0,5 \text{ Э}$ .

### Список источников

- [1] **Odinokov, S.** Optoelectronic Device for Reading of Hidden Magnetic Information from the Holograms / S. Odinokov, A. Kuznetsov, A. Gubarev // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2008. — Vol. 17. — № 1. — P. 15–22. — DOI: 10.3103/S1060992X08010037.
- [2] **Губарев А. П.** Защитные голограммы с латентными, случайно распределенными магнитными микроразмерными частицами / А. П. Губарев, А. Н. Шалыгин, А. Д. Щербина, А. С. Кузнецов, С. Б. Одинокоев. В сборнике: IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — 2019. — С. 661–662.
- [3] Патент № 2748106 С1 Российская Федерация, МПК В42D 25/369, G06K 19/12, D21H 21/40. Защитный элемент на основе скрытых магнитных микроструктурных образований и способ защиты изделий от подделки : № 2020108812 : заявл. 28.02.2020 : опубл. 19.05.2021 / А. Н. Шалыгин, А. П. Губарев, К. С. Филюкина [и др.]. – EDN ХОБОРУ.

# Protection of valuable products, documents or holograms by magnetic microstructural formations

*A. S. Kuznetsov<sup>1</sup>, M. V. Volkova<sup>1</sup>, A. P. Gubarev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> LLC «NPP VICHHEL», Moscow, Russia

A protective element based on magnetic microstructural formations designed to protect valuable documents, including holograms, is proposed. The protective element is formed by a combination of magnetic particles with different coercive forces and sizes. The use of weak remagnetizing planar magnetic fields and visualization based on the Faraday effect using magneto-optical bismuth-containing ferrite-garnet structures will make it possible to control the characteristic dynamic protective effects.

*Keywords:* Security hologram, magneto-optics, magneto-optical Faraday effect, document protection.

# Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора

А. Ю. Мешалкин<sup>1</sup>, С. А. Шойдин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

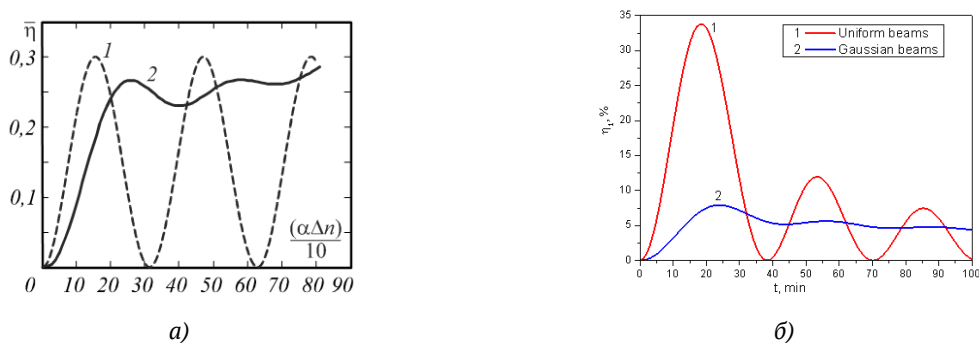
Показано, что найденное несколько лет назад ограничение дифракционной эффективности фазовых голограмм с Брэгговским механизмом дифракции, вызванное перекрёстным взаимодействием нелинейной экспозиции по полю голограмм и нелинейной зависимостью дифракционной эффективности от экспозиции, распространяется и на дифракцию Рамана-Ната. Экспериментально подтверждено проявление формфактора в регистрирующей среде на основе многослойной структуры ХСП и в азополимерах. Показано как формфактор, ограничивающий информационную ёмкость голограмм, может быть использован в задачах измерения кинетики разрабатываемых голографических материалов (Патент RU2734093C1). Приводится ряд работ, показывающих актуальность предложенного метода.

*Ключевые слова:* Голография, Дифракционная эффективность, Энтропия, Формфактор, Динамический диапазон фотоотклика.

*Цитирование:* Мешалкин, А. Ю. Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 306–312.

## Введение

Интерес к оптическим явлениям, в которых присутствует дифракция света, берущий свое начало в 1666 году, когда Франческо Гримальди показал огибание светом препятствий (выходом в область геометрической тени) и назвавший данное явление дифракцией не только не ослабевает до сих пор, но и находит всё новые применения в силу обнаружения его новых проявлений, в частности при взаимовлиянии двух нелинейных эффектов, дифракционной эффективности (ДЭ) и распределения интенсивности по полю голограммы. Этот эффект был обнаружен в [1, 2] при наблюдении отклонения экспериментальной кинетики ДЭ от теоретической зависимости для дифракции Брэгга на пропускание, при этом первый пик ДЭ был смещен в область большей экспозиции и максимально высокое достижимое значение ДЭ не достигало 100%, как показано на рис. 1а. Позже, аналогичный эффект был замечен [3, 4] и в голограммах с дифракцией Рамана-Ната [5] (рис. 1б).

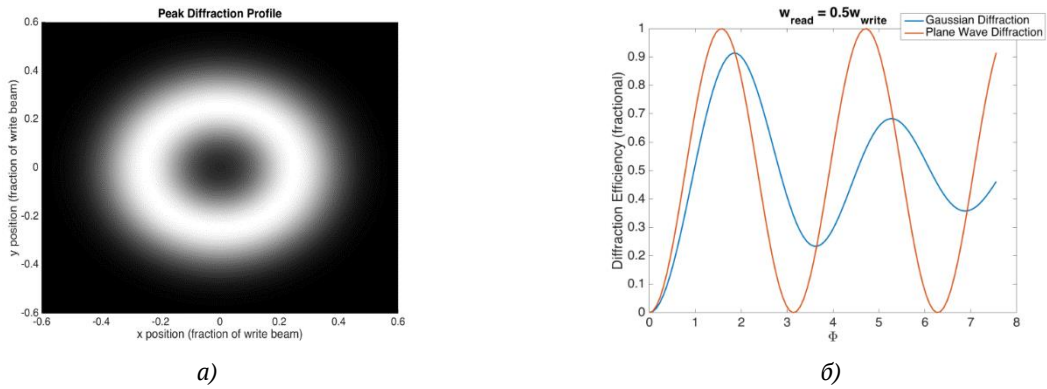


**Рис. 1.** Дифракционная эффективность:

- а) брэгговских голограмм равномерных пучков – кривая 1 – для удобства сравнения нормированная на максимальное в пределах графика значение кривой 2), представляющей собой кинетику согласно [6]  $\eta_1 = \sin^2(\Delta\varphi/2)$ ,  $\Delta\varphi = 2\pi/\lambda(\Delta nd)$ ,  $\lambda$  – длина волны падающего на решетку света,  $\Delta n$  – глубина модуляции показателя преломления решетки,  $d$  – толщина слоя решетки, в сравнении со средней ДЭ голограммы гауссовых пучков (кривая 2);
- б) голограмм Рамана-Ната ( $\eta_m = J_m^2(\Delta\varphi/2)$  [5], где  $\Delta\varphi = 2\pi/\lambda(2\Delta d)$ ,  $\Delta d$  – глубина поверхностного рельефа), где кинетика ДЭ первого порядка от экспозиции для голограмм, записанных равномерными пучками (кривая 1) и гауссовыми пучками (кривая 2)

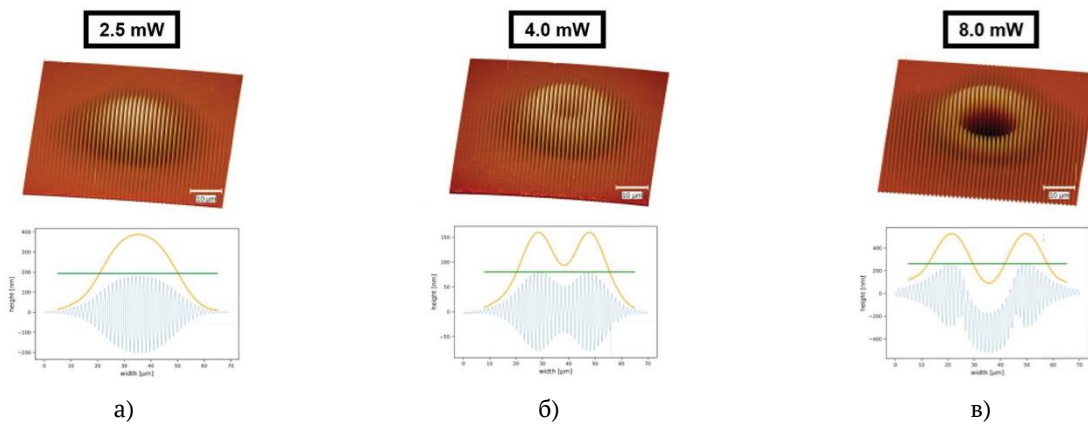
Следует отметить, что данное явление похоже на известные эффекты проявления фактора формы полей, как в гравитационном взаимодействии [7, 8], так и в ядерных взаимодействиях [9–11]. Оно также наблюдается и в работах по голографии других авторов, хотя и не всегда бывает ими обнаружено.

Так, в работе [12] показано, что при достижении эффекта перемодуляции, дифракционная картина начинает структурироваться, как показано на рис. 2. При записи решетки гауссовыми пучками после достижения первого пика интенсивности ДЭ происходит дальнейшее уменьшение интенсивности в центре пятна с образованием кольцеобразной структуры. При этом дифракционная эффективность всей решетки отличается от дифракционной эффективности равномерной решетки и сильно зависит от неравномерности гауссового пятна и/или отношения диаметров записывающего/считывающего пучков. Из сравнения графиков рисунка 2б и 1а видно, что данная закономерность описывается формфактором голограммы.



**Рис. 2.** а) Изображение дифракционного порядка решетки с перемодуляцией;  
 б) Зависимость дифракционной эффективности для равномерной решетки и гауссовой решетки [12]

Также, в работе [13] авторы показали запись пиксельных («DotMatrix») голограмм на азополимерных слоях с различной интенсивностью пучка записи. Как видно на рис. 3, в зависимости от интенсивности пучка, каждый пиксель голограммы, исследованный с помощью атомно-силового микроскопа, трансформируется из пикселя с гауссовым распределением модуляции поверхности, в пиксель с провалом в центре пятна, определяющим фактор формы.



**Рис. 3.** Изображения пикселей записанной голограммы с различной интенсивностью пучка записи: а) 2,5 мВт; б) 4,0 мВт, и в) 8,0 мВт

В работе [14] эффект формфактора наблюдается при записи поляризационных решеток на слоях фоточувствительных халькогенидных стекол. Как видно на рис. 4а, в процессе записи поляризационных решеток гауссовыми пучками формируется кольцеобразная структура, состоящая из чередующихся светлых и темных колец. Данная картина аналогична дифракционной картине рельефной решетки, записанной на халькогенидных многослойных структурах, с помощью гауссового пучка, в структуре которой вследствие формфактора наблюдается кольцеобразная структура (рис. 4б).



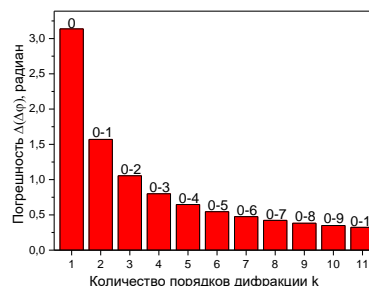
**Рис. 4.** а) Изображение дифракционного пятна решетки, записанной на слое халькогенидного стеклообразного полупроводника [14];

б) Изображение дифракционного пятна первого порядка решетки, записанной на многослойной структуре стеклообразного полупроводника с помощью гауссовых пучков [15]

Аналогичные результаты можно увидеть и в работах [16–22].

Казалось бы, что обнаруженный эффект формфактора голограмм, который значительно снижает дифракционную эффективность голограмм, чем ограничивает их энтропию и требует увеличения экспозиции либо интенсивности записывающих пучков для достижения максимального значения ДЭ, в дальнейшем будет избегаться экспериментаторами, либо будут учитывать его влияние. Однако в полученном патенте [23] влияние формфактора голограммы было предложено для экспресс анализа величины динамического диапазона фазового фотоотклика голографического материала в случае дифракции Брэгга и Рамана-Ната, что может быть использовано для неразрушающего и бесконтактного определения диапазона фотоотклика голографического материала и кинетики его формирования непосредственно в процессе записи голограмм. Данный метод позволяет в процессе одной экспозиции достаточно точно оценить глубину фазовой модуляции исследуемого фоточувствительного материала, и использовать эти данные для сравнения и применения этого материала в качестве голографической регистрирующей среды.

В работе [24] показано, что увеличение количества рассматриваемых дифракционных порядков для анализа фазового фотоотклика позволяет увеличить точность измерения в  $k$  раз (рис. 5), где  $k$  – количество дифракционных порядков (от  $\lambda/2$  ( $\pi$  радиан) для одного дифракционного порядка до  $\lambda/20$  ( $\pi/10$  радиан) для 10 порядков).



**Рис. 5.** Зависимость погрешности измерения от количества исследуемых порядков  $k$  (до 11).

Видно, что точность нового дифракционного метода экспериментального измерения кинетики ДЭ новых голографических материалов сравнима или превосходит точность классических интерференционных методов.

### Список источников

- [1] **Shoydin, S. A.** Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms / S. A. Shoydin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23. – №. 4. – P. 287-294. – ISSN 1060-992X.
- [2] **Shoydin, S. A.** A method of achieving the maximum diffraction efficiency of holograms based on optimizing the formfactor / S. A. Shoydin // Comput. Opt. – 2016. – Vol. 40. – № 4. – P. 501–507. <http://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507>.
- [3] **Мешалкин, А. Ю.** Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана-Ната / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // HOLOEXPO 2019: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – С. 279–289. ISBN 978-5-7038-5251-4.
- [4] **Shoydin S. A.** Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin, M. S. Kovalev // Optical Materials Express. – 2020. – Т. 10. – № 8. – С. 1819-1825. <https://doi.org/10.1364/OME.399017>.
- [5] **Goodman, J. W.** Introduction to Fourier Optics. 2nd Edition / J. W. Goodman. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 441 p.
- [6] **Kogelnik, H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // The Bell System Technical Journal. – 1969. – Т. 48. – № 9. – С. 2909-2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>.
- [7] **Знаменский, В. В.** Общий курс полевой геофизики: Учебник для вузов / В. В. Знаменский. – Ленинград: Недра, 1989. – 520 с. ISBN:5-247-00666-6.
- [8] **Миронов, В. С.** Курс гравиразведки. 2-е изд., перераб. и доп. / В. С. Миронов. – Ленинград: Недра, 1980. – 543 с.
- [9] **Фейнман, Р. Ф.** Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Ф. Фейнман, А. Хибс; пер. с англ. Ю. Л. Обухова и Э. М. Барлита; под ред. В. С. Барашенкова. – Москва: Мир, 1968. – 384 с.
- [10] **Вест, А. Р.** Химия твердого тела. Теория и приложения: В 2-х ч. Ч. 1 / А. Р. Вест; пер. с англ. А. Р. Кауля и И. Б. Куценка; под ред. Ю. Д. Третьякова. – Москва: Мир, 1988. – 558 с. ISBN:5-03-000056-9.
- [11] **Биленькая, С. И.** Электромагнитный формфактор протона и тяжёлые гипотетические частицы / С. И. Биленькая, С. М. Биленький, Ю. М. Казаринов, Л. И. Лapidус // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19. – Вып. 9. – С. 613-616.
- [12] **Sullivan, A. C.** Holographic analysis of photopolymers / A. C. Sullivan, M. D. Alim, D. J. Glugla, R. R. McLeod // Proc. SPIE 10233, Holography: Advances and Modern Trends V. – 2017. – Vol. 10233. – № 2. – P. 102330B. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>.
- [13] **Stolz, D.** One-step fabrication of surface relief dot-matrix holograms using supramolecular azopolymer thin films / D. Stolz, J. Strobel, M. Leven, L. Kurlandski, H. Abourahma, D. J. McGee // Proc. SPIE 11710, Practical Holography XXXV: Displays, Materials, and Applications. – 2021. – Vol. 11710. – № 2. – P. 1171008. <https://doi.org/10.1117/12.2582763>.
- [14] **Golub, P.** Director modulation of nematic liquid crystal on photosensitive chalcogenide surface / P. Golub, Yu. Kurioz, N. Sheremet, M. Trunov, and Yu. Reznikov // Molecular Crystals And Liquid Crystals. – 2018. – Vol. 661. – P. 25–37. <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1460235>.

- [15] **Shoydin, S. A.** Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin, M. S. Kovalev // *Optical Materials Express*. – 2020. – Т. 10. – № 8. – С. 1819–1825. <https://doi.org/10.1364/OME.399017>.
- [16] **Gallego, S.** Overmodulation effects in volume holograms recorded on photopolymers / S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, C. García, A. Beléndez, I. Pascual // *Optics Communications*. – 2003. – Vol. 215. – № 4. – P. 263–269. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02244-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02244-7).
- [17] **Sullivan, A. C.** Holographic analysis of photopolymers / A. C. Sullivan, M. D. Alim, D. J. Glugla, R. R. McLeod // *Proc. SPIE 10233, Holography: Advances and Modern Trends V*. – 2017. – Vol. 10233. – P. 102330B. <https://doi.org/10.1117/12.2265865>.
- [18] **Ciapurin, I. V.** Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass / I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, V. I. Smirnov // *Proc. SPIE 5742, Practical Holography XIX: Materials and Applications*. – 2005. – Vol 5742. <https://doi.org/10.1117/12.591215>.
- [19] **Sabel, T.** *Volume Holography: Novel Materials, Methods and Applications* / T. Sabel, M. C. Lensen. – Rijeka: IntechOpen, 2022. – 518 p.
- [20] **Jelken, J.** Solving an old puzzle: fine structure of diffraction spots from an azo-polymer surface relief grating / J. Jelken, C. Henkel and S. Santer // *Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 125. – № 11. – P. 218. <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7331-8>.
- [21] **Jelken, J.** Polarization controlled fine structure of diffraction spots from an optically induced grating / J. Jelken, C. Henkel, and S. Santer // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 116. <https://doi.org/10.1063/1.5140067>.
- [22] **Sobolewska, A.** On the long time holographic grating recording process in azo-polymer / A. Sobolewska and S. Bartkiewicz // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 95. <https://doi.org/10.1063/1.3232223>.
- [23] **Патент RU2734093C1.** Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала / С. А. Шойдин, А. Ю. Мешалкин. Российская Федерация, МПК G03H 1/00, G01M 11/00; заявл. 07.04.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.
- [24] **Мешалкин, А. Ю.** Дифракционный способ измерения динамического диапазона фотоотклика голографического фазового материала / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // *HOLOEXPO 2020: XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – С. 235-245. ISBN:978-5-7038-5516-4.

## Actual research on the kinetics of hologram recording using a form factor

*A. Y. Meshalkin<sup>1</sup>, S. A. Shoydin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics, Chisinau, Moldova

<sup>2</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

It is shown that the limitation of the diffraction efficiency of phase holograms with the Bragg diffraction mechanism found several years ago, caused by the cross-interaction of nonlinear exposure over the hologram field and the nonlinear dependence of the diffraction efficiency on exposure, extends to Raman-Nath diffraction. The manifestation of the form factor in the recording medium based on the multilayer structure of CGS and in azopolymers has been experimentally confirmed. It is shown how the form factor limiting the information capacity of holograms can be



used in the tasks of measuring the kinetics of holographic materials being developed (Patent RU2734093C1). A number of papers are presented showing the relevance of the proposed method.

*Keywords:* Holography, Diffraction efficiency, Entropy, Formfactor, Photoresponse dynamic range.

# Разрешающая способность неорганического халькогенидного резиста при записи голограмм

*М. Д. Михайлов<sup>1,2</sup>, А. В. Бельх<sup>1,3</sup>, И. Ю. Юсупов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> АО НПО Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ООО Хологрэйт, Санкт-Петербург, Россия

Обобщена информация о возможностях халькогенидного фоторезиста при записи на нем рельефно-фазовых голограмм и его перспективах. Несовпадение экспериментально получаемой и ожидаемой формы рельефа дифракционных структур обусловлено диффузией возбужденных электронных состояний из облучаемых областей в необлучаемые. Наличие данного эффекта позволяет записывать голограммы на многослойных структурах, состоящих из последовательности халькогенидных слоев разного состава и, соответственно, разной фоточувствительности. Используя специфику свойств халькогенидного фоторезиста, можно получать многослойные рельефные структуры, дающие цветные изображения в нулевом порядке дифракции.

*Ключевые слова:* Фоточувствительные пленки, Сульфид мышьяка, Селенид мышьяка, Дифракционные решетки, Рельефно-фазовые голограммы

*Цитирование:* Михайлов, М. Д. Разрешающая способность неорганического халькогенидного резиста при записи голограмм / М. Д. Михайлов, А. В. Бельх, И. Ю. Юсупов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 313–315.

В настоящем докладе мы впервые систематизируем накопленную информацию о свойствах халькогенидных фоторезистов с целью показать возможности материала и его перспективы. Величина фоточувствительности халькогенидных слоев зависит от длины волны: чем меньше длина волны, тем фоточувствительность выше. Например, у пленок состава  $As_{36}S_{44}Se_{20}$  при изменении длины волны от 442 до 488 нм коэффициент поглощения уменьшается в 2,5 раза и примерно во столько же раз уменьшается рабочая экспозиция изменяется от 75–100 мДж/см<sup>2</sup> до 150–200 мДж/см<sup>2</sup>.

Исторически одним из преимуществ халькогенидных фоторезистов считалась их высокая разрешающая способность. Действительно, запись как плоских, так и вогнутых дифракционных решеток с частотой от 600 до 3600 линий/мм позволяет получать решетки, удовлетворяющие всем требованиям к решеткам для спектральных приборов. На рис. 1 слева приведен рассчитанный на основе данных по скорости травления и ее зависимости от экспозиции профиль для решетки с частотой 1200 линий/мм, Справа приведен экспериментальный профиль (халькогенидный слой покрыт слоем алюминия толщиной 200 нм).

Аккуратные измерения зависимости скорости травления пленок от глубины показывают, что изменения скорости растворения происходят на глубинах, значительно превосходящих глубины, до которых распространяется свет при экспонировании (рис. 2).

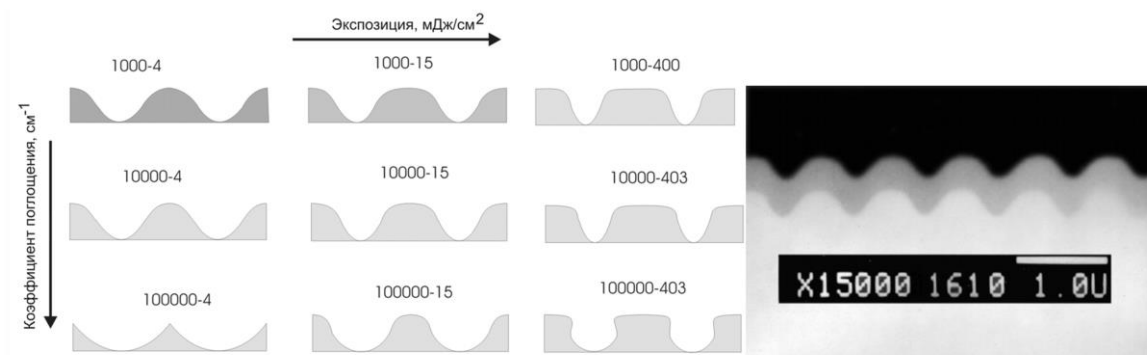


Рис. 1. Расчетный и экспериментальный профиль решетки с частотой 1200 линий/мм.

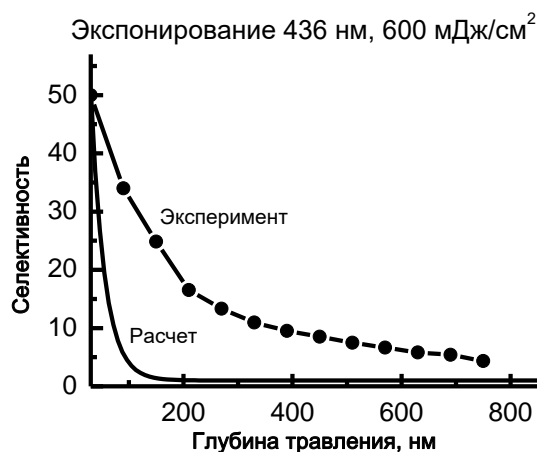


Рис. 2. Зависимость селективности травления пленок  $As_{39}S_{61}$  от глубины при экспонировании светом с длиной волны 436 нм

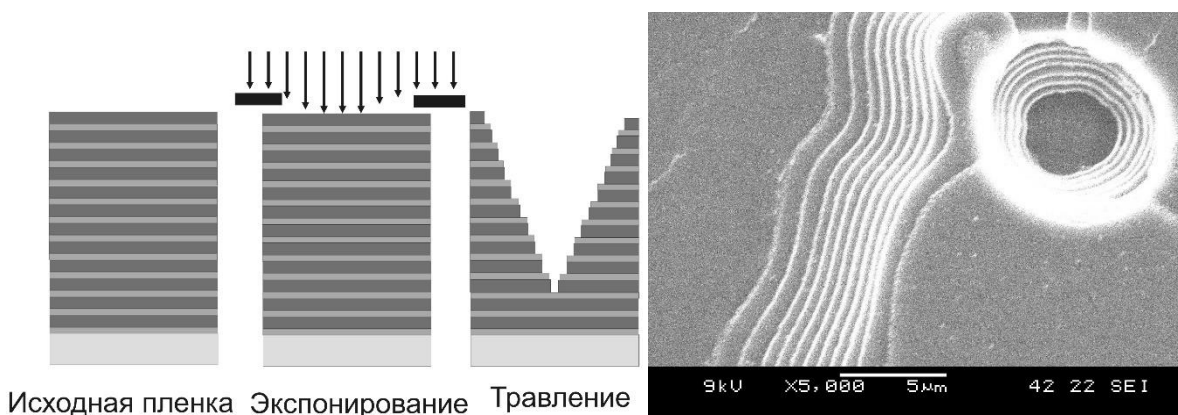


Рис. 3. Схема экспонирования и травления многослойных структур и экспериментально полученная дифракционная структура

Мы полагаем, что наблюдающиеся эффекты связаны с полупроводниковыми свойствами халькогенидных слоев. При экспонировании в слое происходит генерация электронно-

дырочных пар, которые далее диффундируют в не экспонируемые области. Оценки показывают, что для того, чтобы объяснить наблюдаемые величины расстояний, коэффициент амбиполярной диффузии должен быть порядка  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  см·с, что хорошо согласуется с известными данными по дрейфовой подвижности носителей заряда в материалах данного класса.

Перенос возбуждения из одного халькогенидного слоя в другой позволяет экспонировать многослойные структуры. Для этого тонкие слои, поглощающие, чередуются с более толстыми слоями прозрачного материала. При экспонировании такой структуры фотоструктурные превращения происходят во всех слоях — в тонких слоях за счет поглощения света, а в толстых – за счет переноса возбуждения. Схема эксперимента приведена на рис. 3, там же показан результат экспонирования и последующего травления. Структура, изображенная на рис. 3, характеризуется максимумом отражения на длине волны, равной удвоенной толщине пары слоев. Эта структура аналогична известной «ацтек» структуре. Ее важным достоинством является тиражируемость рельефа с помощью фотополимерных композиций.

Таким образом, аморфные халькогенидные пленки являются к настоящему времени фоточувствительными материалами, степень изученности которых позволяет использовать их как в серийном производстве, так и в научных экспериментах. Их недостатки, в т.ч. токсичность (в большей степени связанная с предубеждениями, чем с реальностью) компенсируются их технологическими преимуществами, перечисленными в данном докладе.

## **Resolution ability of inorganic chalcogenide resist for hologram recording**

*M.D. Mikhailov<sup>1,2</sup>, A.V. Belykh<sup>1,3</sup>, I.Yu. Yusupov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> S. I. Vavilov's State Optical Institute, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Holograte Ltd. Saint-Petersburg, Russia

Information about chalcogenide photoresist as a medium for the recording of relief-phase holograms is given. There is a difference of calculated relief shape and obtained experimentally. This difference can be explained by diffusion of the excited electronic state from the irradiated area to non-irradiated. This effect lets us to record holograms into multilayer structures, which are constructed from chalcogenide layers with different composition and photosensitivity. As an example, we can obtain multilayer relief structures, that give color images in zero diffraction order.

*Keywords:* Photosensitive films, Arsenic sulfide, Arsenic selenide, Diffraction gratings, Relief phase holograms.

# Влияние редкоземельных ионов на голографические свойства хлорсодержащего фото-термо-рефрактивного стекла

*Х. Нассер, Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, А. И. Игнатъев*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло представляет собой голографический материал, который меняет показатель преломления после УФ-облучения и термообработки из-за выделения нанокристаллов NaF. Недавно было разработано новое хлорсодержащее ФТР стекло. Оно позволяет ввести большее количество серебра по сравнению с классическим ФТР стеклом, уменьшить размеры нанокристаллов NaF и, соответственно, рассеяние. В настоящей работе хлорсодержащее ФТР стекло активировано неодимом. Изучено влияние концентрации неодима на фото-термо-индуцированную кристаллизацию и модуляцию показателя преломления. Объемные брэгговские решетки были успешно записаны в ФТР стекле. Активация редкоземельными ионами хлорсодержащего ФТР стекла открывает новые возможности для применения его в фотонных интегральных устройствах.

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивное стекло, решетка Брэгга, неодим, модуляция показателя преломления.

*Цитирование:* **Нассер, Х.** Влияние редкоземельных ионов на голографические свойства хлорсодержащего фото-термо-рефрактивного стекла / Х. Нассер, Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, А. И. Игнатъев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 316–321.

## Введение

Оптические стекла, активированные редкоземельными ионами, такими как  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ , представляют большой интерес для применения в лазерах, датчиках, и оптических волокнах [1]. Неодим является одним из наиболее эффективных и интересных активаторов для лазеров ближнего инфракрасного диапазона [2]. Он обладает широкими полосами излучения, охватывающими видимую и ближнюю области спектра, а неодимовые лазеры характеризуются высокой эффективностью даже при комнатной температуре [3].

Неорганические стекла обладают механической стабильностью, хорошей прозрачностью и термостойкостью. Среди всех стеклянных матриц фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло является перспективным материалом, который широко используется в настоящее время [4–6]. Спектральные и лазерные свойства редкоземельных ионов в ФТР стеклах были изучены во многих работах [7,8].

ФТР стекло также используется в качестве голографического оптического материала. Оно меняет показатель преломления после УФ-облучения и термообработки из-за выделения нанокристаллов NaF, что позволяет нам записывать различные голографические оптические элементы, такие как объемные брэгговские решетки, волноводы, мультиплексоры, и объединители лазерных лучей [9]. Объединение лазерных и голографических свойств этого материала дает возможность его использования в лазерах с распределенной обратной связью

(РОС) [10]. В РОС-лазерах решетка Брэгга, записанная в активной среде, действует как селективное зеркало. Она обеспечивает положительную обратную связь в резонаторе, что позволяет получить излучение с узкой полосой пропускания. В классическом ФТР стекле, содержащем бром, изменение показателя преломления происходит из-за осаждения нанокристаллов NaF во время процесса фото-термо-индуцированной (ФТИ) кристаллизации. Нанокристаллы NaF имеют показатель преломления меньший чем показатель преломления матрицы стекла, что приводит к отрицательному изменению показателя преломления в облученных местах [11]. В этом стекле кристаллическая фаза растет на наночастицах серебра после осаждения бромсодержащей диэлектрической оболочки.

Недавно было разработано новое хлорсодержащее ФТР стекло [12]. Преимущество этого стекла заключается в том, что оно позволяет ввести большее количества серебра по сравнению с классическим ФТР стеклом, что приводит к уменьшению размер нанокристаллов NaF, и, следовательно, уменьшению рассеяния света на нанокристаллы. Активация такого стекла ионами редкоземельных элементов может быть весьма перспективным для применения. Таким образом, целью данной работы является изучение голографических свойства хлорсодержащего ФТО стекла, и влияние активации ионами неодима на фото-термо-индуцированную кристаллизацию и модуляцию показателя преломления.

### **1. Объекты исследования и методика экспериментов**

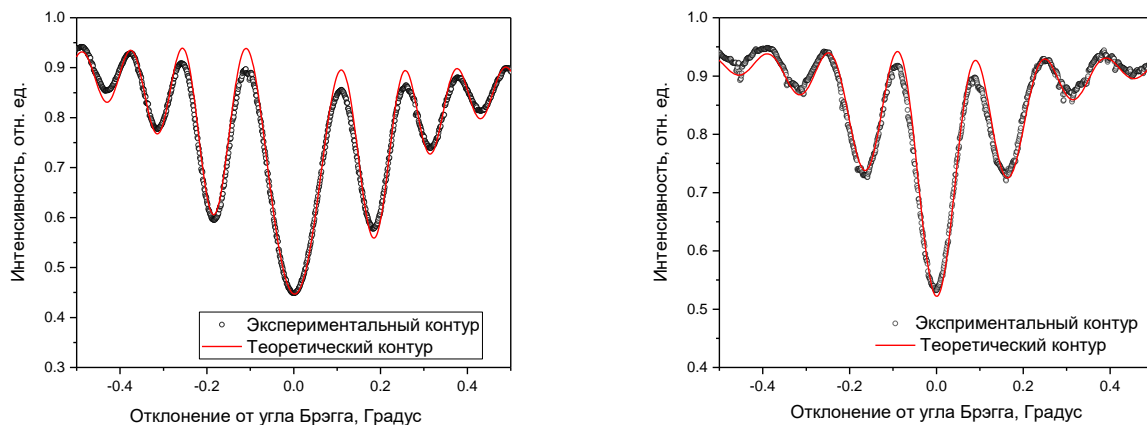
ФТР стекло было разработано в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{NaF}-\text{NaCl}$  и легировано  $\text{Ag}_2\text{O}$ ,  $\text{CeO}_2$  и  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  в качестве фоточувствительных компонентов. Стекло было синтезировано с помощью того же метода, описанного в работе [12]. Оксид неодима был введен в состав стекла через эквимольную замену оксида алюминия. Образцы были подготовлены для оптических и голографических измерений.

Температуру стеклования ( $T_g$ ) определяли для каждого стекла с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии.

УФ-облучение и запись решеток Брэгга были проведены лазером He-Cd (TEM00, Kimmon, 325 нм). Интерференционные картины были получены в образце с помощью интерферометра Ллойда. Термическую обработку экспонированных образцов проводили с использованием муфельной печи с программным управлением (Nabertherm). Эффективности решеток Брэгга были измерены с помощью He-Ne лазера длиной волны 632,8 нм. Контуры угловой селективности были получены в пределах  $1,2^\circ$  вокруг угла Брэгга. Модуляция показателя преломления была рассчитана применением теории связанных волн.

### **2. Результаты и обсуждение**

На рисунке 1 показаны контуры угловой селективности нулевого порядка дифракции от решеток Брэгга, записанных в исходном ФТР стекле и стекле, активированном ионами неодима в концентрации 0,25 мол. %.



а) Стекло без неодима

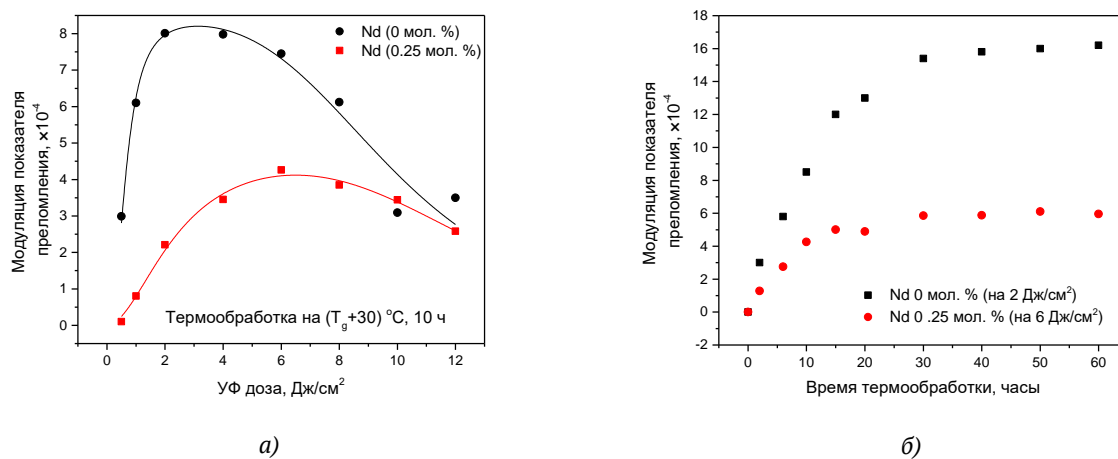
б) Стекло с неодимом

**Рис. 1.** Примеры контуров угловой селективности решеток Брэгга, записанных в хлорсодержащих ФТР стеклах, а) без неодима и б) активированных неодимом

Асимметричная форма контуров относительно угла Брэгга показывает смешанный амплитудно-фазовый характер решетки. Это связано с модуляцией как показателя преломления стекла, так и коэффициента поглощения. Теоретические контуры нулевого порядка дифракции были подобраны с помощью формулы, использованной в работе [13]. Из рисунка 1 видно, что экспериментальные и теоретические кривые очень хорошо совпадают, за исключением некоторых различий в интенсивности боковых лепестков. Это можно объяснить отклонением от идеальной синусоидальной модуляции показателя преломления, которое вызвано недостаточной коллимацией луча записи и градиентным эффектом силы решетки по глубине.

Зависимости модуляции показателя преломления от дозы облучения и времени термообработки для стекла без неодима и стекла с неодимом показаны на рисунке 2. Из рисунка 2 (а) видно, что модуляция показателя преломления для обоих стекол показывает начальное увеличение с дозой облучения, связанное с образованием большего количества центров кристаллизации по мере увеличения дозы, затем оно достигает максимального значения. Максимальное значение для неактивированного стекла было получено при дозе облучения 2 Дж/см<sup>2</sup>, а для стекла, активированного ионами неодима в концентрации 0,25 мол. %, оно наблюдалось при 6 Дж/см<sup>2</sup>. Сдвиг обозначает, что для генерации фотоэлектронов и достижения максимального значения модуляции показателя преломления для активированных стекол требуется больше фотонов. Это скорее всего связано с тем, что спектральная линия лазера He-Cd (на 325 нм) перекрывается с неодимовым переходом  $^4I_{9/2} \rightarrow ^2L_{17/2}$ , поэтому часть фотонов поглощается ионами  $Nd^{3+}$ , а не возбуждает ионы  $Se^{3+}$ . Дальнейшее снижение величины изменения показателя преломления можно объяснить переоблучением, которое приводит к уменьшению изменения показателя преломления между облученной и необлученной областями, увеличению средней интенсивности голограммы и уменьшению контраста интерференционной картины.

Другим замеченным поведением является разница между максимальными значениями модуляции показателя преломления, полученными в обоих стеклах. На рисунке 2 (б) показана зависимость изменения показателя преломления от времени термообработки в исходном и активированном стеклах при дозах облучения 2 и 6 Дж/см<sup>2</sup>, соответственно, при температуре (T<sub>g</sub> + 30) °С. Изменение показателя преломления обладает быстрым ростом с увеличением времени. Это можно объяснить выделением кристаллической фазы NaF. После 15 ч термообработки для обоих стекол достигается максимального стационарного значения модуляции показателя преломления. Для исходного стекла достигается значение 16 × 10<sup>-4</sup>, а для активированного стекла – 4,5 × 10<sup>-4</sup>.



**Рис. 2.** Зависимость модуляции показателя преломления от а) дозы облучения и б) времени термообработки для исходного и активированного стекла.

### Заключение

Хлорсодержащее ФТР стекло было синтезировано и активировано ионами неодима. Голографические свойства как исходного, так и активированного стекол были исследованы. Объемные брэгговские решетки были записаны в обоих стеклах. Дифракционные эффективности решеток Брэгга были измерены. Модуляция показателя преломления была подобрана из контуров угловой селективности. Было получено что максимальное значение изменение показателя преломления исходного и активированного стекла достигается при дозах облучения 2 и 6 Дж/см<sup>2</sup>, соответственно. такой сдвиг может быть связан с перекрытием полос поглощения ионов церия и неодима на длине волны 325 нм, соответствующей длину волны лазера He-Cd, использованного для записи голограммы.

Новое хлорсодержащее ФТР стекло, активированное редкоземельными ионами, является перспективным материалом, и открывает новые возможности для применения в области фотонных интегральных устройствах.

### Благодарность

Исследование осуществлено в рамках Программы Развития ИТМО–2030.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Samson, B. N.** Efficient neodymium-doped glass-ceramic fiber laser and amplifier / B. N. Samson, N. F. Borrelli, P. A. Tick // *Optics Letters*. — 2001. — Vol 26. — № 3. — P. 145–147.
- [2] **Lukaszewicz, M.** Neodymium-doped germanotellurite glasses for laser materials and temperature sensing / M. Lukaszewicz, B. Klimesz, A. Szmalenberg, M. Ptak, R. Lisiecki // *Journal of Alloys and compounds*. — 2021. — Vol 860. — P. 157923.
- [3] **Brown, E.** Spectroscopic study of neodymium doped potassium lead bromide for mid-infrared solid state lasers / E. Brown, C. B. Hanley, U. Hömmerich, A. G. Bluiett, S. B. Trivedi // *Journal of Luminescence*. — 2013. — Vol 133. — P. 244–248.
- [4] **Nikonorov N.** Photonic, Plasmonic, Fluidic, and Luminescent Devices Based on New Polyfunctional Photo-Thermo-Refractive Glass / N. Nikonorov, V. Aseev, V. Dubrovin, A. Ignatiev, S. Ivanov, E. Sgibnev. — Cham: Springer, 2018. — 83 p.
- [5] **Ivanov, S.** Resonator free Er-Yb laser based on photo-thermo-refractive (PTR) glass / S. Ivanov, V. Aseev // *SPIE conference proceeding*. — 2014: Vol 8959. — P. 89591E. — doi.org/10.1117/12.2037660.
- [6] **Nikonorov N.** New photo-thermo-refractive glasses for holographic optical elements: properties and applications / N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, A. Ignatiev. — Dublin: InTech, 2017. — 435 p.
- [7] **Nasser, K.** Optical, spectroscopic properties and Judd–Ofelt analysis of Nd<sup>3+</sup>-doped photo-thermo-refractive glass / K. Nasser, V. Aseev, S. Ivanov, A. Ignatiev, N. Nikonorov // *Journal of Luminescence*. — 2019. — Vol 213. — P. 255–262.
- [8] **Nasser, K.** Ytterbium-doped chloride photo-thermo-refractive glass: spectral, luminescent, and gain properties / K. Nasser, V. Aseev, A. Ignatiev, N. Nikonorov // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 2021. — Vol 563. — P. 120807.
- [9] **Nikonorov, N.** Design and fabrication of optical devices based on new polyfunctional photo-thermo-refractive glasses / N. Nikonorov, V. Aseev, V. Dubrovin, A. Ignatiev, S. Ivanov, Y. Sgibnev, A. Sidorov // *Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology - PHOTOPTICS*. — 2016. — P. 18–25. — DOI: 10.5220/0005676700180025.
- [10] **Ryasnyanskiy, A.** DBR and DFB lasers in neodymium- and ytterbium-doped photothermorefractive glasses / A. Ryasnyanskiy, N. Vorobiev, V. Smirnov, J. Lumeau, L. Glebova, O. Mokhun, C. Piegelberg, M. Krainak, A. Glebov, L. Glebov // *Optics Letters*. — 2014. — Vol 39. — P. 2156–2159.
- [11] **Ivanov, S.** Origin of refractive index change in photo-thermo-refractive glass / S. Ivanov, V. Dubrovin, N. Nikonorov, M. Stolyarchuk, A. Ignatiev // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 2019. — Vol 521. — P. 1–4.
- [12] **Nasser, K.** A novel photo-thermo-refractive glass with chlorine instead of bromine for holographic application / K. Nasser, S. Ivanov, R. Kharisova, A. Ignatiev, N. Nikonorov // *Ceramics International*. — 2022. — In press
- [13] **Beléndez, A.** Study of angular responses of mixed amplitude–phase holographic gratings: shifted Borrmann effect / A. Beléndez, A. Fimia, L. Carretero, R. F. Madrigal, S. Blaya // *Optics Letters*. — 2001. — Vol 26. — № 11. — P. 786–788.

# The effect of rare-earth ions on the holographic properties of chlorine-containing photo-thermo-refractive

*K. Nasser, N. V. Nikonorov, A. I. Ignatiev, S. A. Ivanov*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Photo-thermo-refractive (PTR) glass is a holographic material that changes its refractive index after UV irradiation and heat treatment due to NaF-nanocrystals precipitation. Recently, a new chlorine-containing PTR glass has been developed. This type allows introducing more silver in comparison with classical PTR glass, reducing the size of NaF-nanocrystals, thus reducing the scattering. In this work, a neodymium-doped chlorine-containing PTR glass do was synthesized. The effect of neodymium on photo-thermo-induced crystallization and refractive index modulation has been studied. Volume Bragg gratings were successfully recorded. Doping the chlorine-containing PTR glass with rare-earth ions opens new possibilities for applications in photonic integrated devices.

*Keywords:* Photo-thermo-refractive glass, Volume Bragg grating, Neodymium, Refractive index change.

# Запись монохромных и цветных голограмм в фотополимерном материале с использованием борат-сульфониевого комплекса с переносом заряда

Д. И. Деревянко<sup>1</sup>, Е. Ф. Пен<sup>2</sup>, В. В. Шелковников<sup>1</sup>, В. В. Бардин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Монохромные и цветные (сине-зелено-красные) объемные отражательные голограммы получены с использованием однослойных фотополимерных материалов с новой фотоиницирующей системой на основе сульфониевых и боратных солей. Достигнуты значения дифракционной эффективности цветных голограмм ~30–80 %, монохромных голограмм 90–95 %.

*Ключевые слова:* фотополимеры, модуляция показателя преломления, отражательные голограммы, цветная голография.

*Цитирование:* Деревянко, Д. И. Запись монохромных и цветных голограмм в фотополимерном материале с использованием борат-сульфониевого комплекса с переносом заряда / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников, В. В. Бардин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 322–329.

## Введение

В настоящее время активно разрабатываются элементы фотоники для нужд дифракционной и интегральной оптики [1-3]. Для создания оптических элементов, могут быть использованы голографические фотополимерные материалы (ГФПМ), обладающие высокой разрешающей способностью и дифракционной эффективностью. Существуют коммерческие варианты ГФПМ, производимые фирмами DuPont (США) [4] и Covestro AG (Германия) [5], вместе с тем продолжают исследования и разработки новых оригинальных фотополимерных материалов [6,7].

Одним из ключевых компонент фотополимеризующихся композиций является фотоиницирующая система, которая определяет величину и спектральную область светочувствительности голографических сред этого типа. Чувствительность разрабатываемых ГФПМ находится в диапазоне 30 – 100 мДж/см<sup>2</sup> [8]. Как правило, поглощение голографических фотополимерных материалов в широкой области видимого спектра достигается комбинацией фотоиницирующих систем [9-11], вещества которых не всегда совместимы, что вынуждает изготавливать многослойные ГФПМ [12].

Альтернативным подходом является использование fotocувствительных комплексов с переносом заряда (КПЗ) [13]. В таких комплексах происходит перенос заряда электрона с высшей занятой молекулярной орбитали (ВЗМО) донора на низшую свободную

молекулярную орбиталь (НСМО) акцептора, в результате чего разница энергий между ВЗМО и НСМО может стать меньше, чем в исходных молекулах, что приводит к поглощению излучения в длинноволновой области спектра.

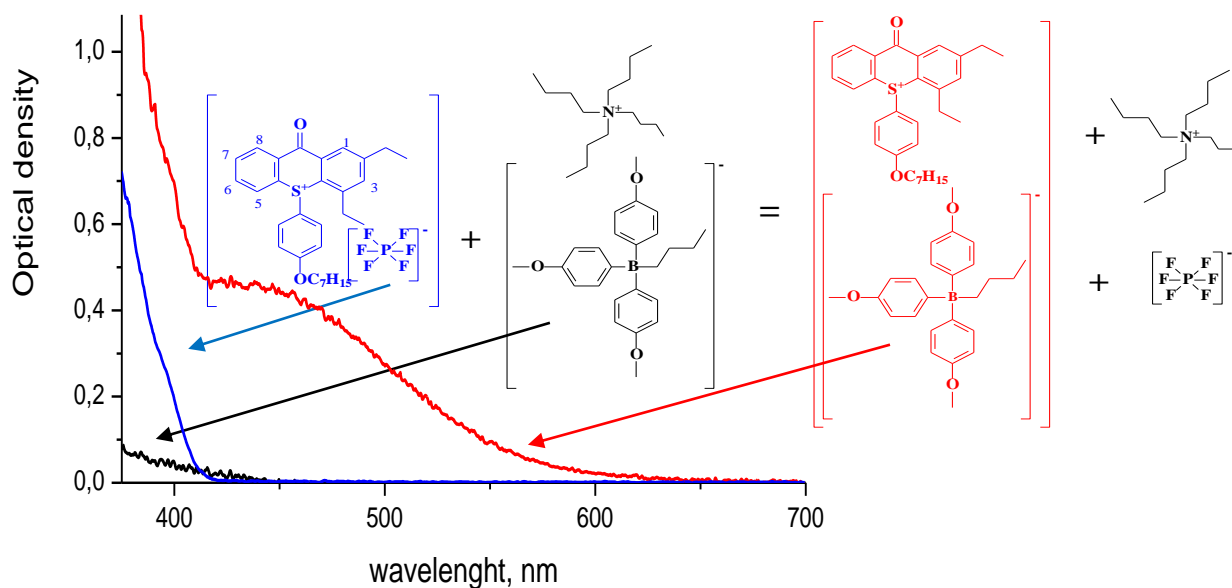
Известно, что соли сульфония являются эффективными фотоинициаторами в УФ-области и могут быть использованы для проведения катионной и радикальной полимеризации. Соли боратов являются эффективными соинициаторами для проведения голографической записи оптических элементов [14].

Целью данной работы является использование нового фоточувствительного комплекса на основе сульфониевой производной тиоксантен-9-она (СС) [15] и соли бората – бутилтрис(4-метоксифенил)бората тетрабутиламмония (СБ) [16] для записи монохромных (синие, зеленые, красные) и цветных отражательных голограмм с высокой дифракционной эффективностью в однослойных ГФПМ.

## Основная часть

### 1. Фотоиницирующая система СС-СБ

Добавление СБ к СС приводит к батохромному сдвигу в спектре поглощения (рис. 1).



**Рис.1.** Графики спектров поглощения солей сульфония (синий), бората (черный) и их смеси (красный цвет рисунков) в хлороформе

Появление полосы поглощения в видимой области спектра можно объяснить образованием комплекса между компонентами СБ и СС, что является перспективным для записи цветных голограмм с помощью лазерного излучения с длинами волн  $\lambda = 405, 457, 532$ .

Отметим, что в ЯМР  $^1\text{H}$  спектрах химические сдвиги протонных сигналов СС и в комплексе СС-СБ различны, это связано с увеличением локализации положительного заряда на атоме серы, когда в качестве аниона выступает  $[\text{C}_4\text{H}_9\text{B}(\text{4-CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4)_3]^-$ . Например, сигнал атома  $\delta(\text{H-5})$  сдвигается от 8.31 до 7.57 м.д.. Дезэкранирование атомов  $\text{CH}_2\text{N}$  тетрабутиламмониевого катиона от 2.13 м.д. в СБ до 2.82 м.д. в растворе [СБ117-11+SSDETХ],

указывает на образование тесной ионной пары  $\{C_{30}H_{35}O_2S, C_4H_9B(4-CH_3OC_6H_4)_3\}$  и свободных сольватно разделенных ионов  $\{(C_4H_9)_4N\}^+, [PF_6]^{-}\}$ .

## **2. Метод приготовления образцов голографического фотополимерного материала**

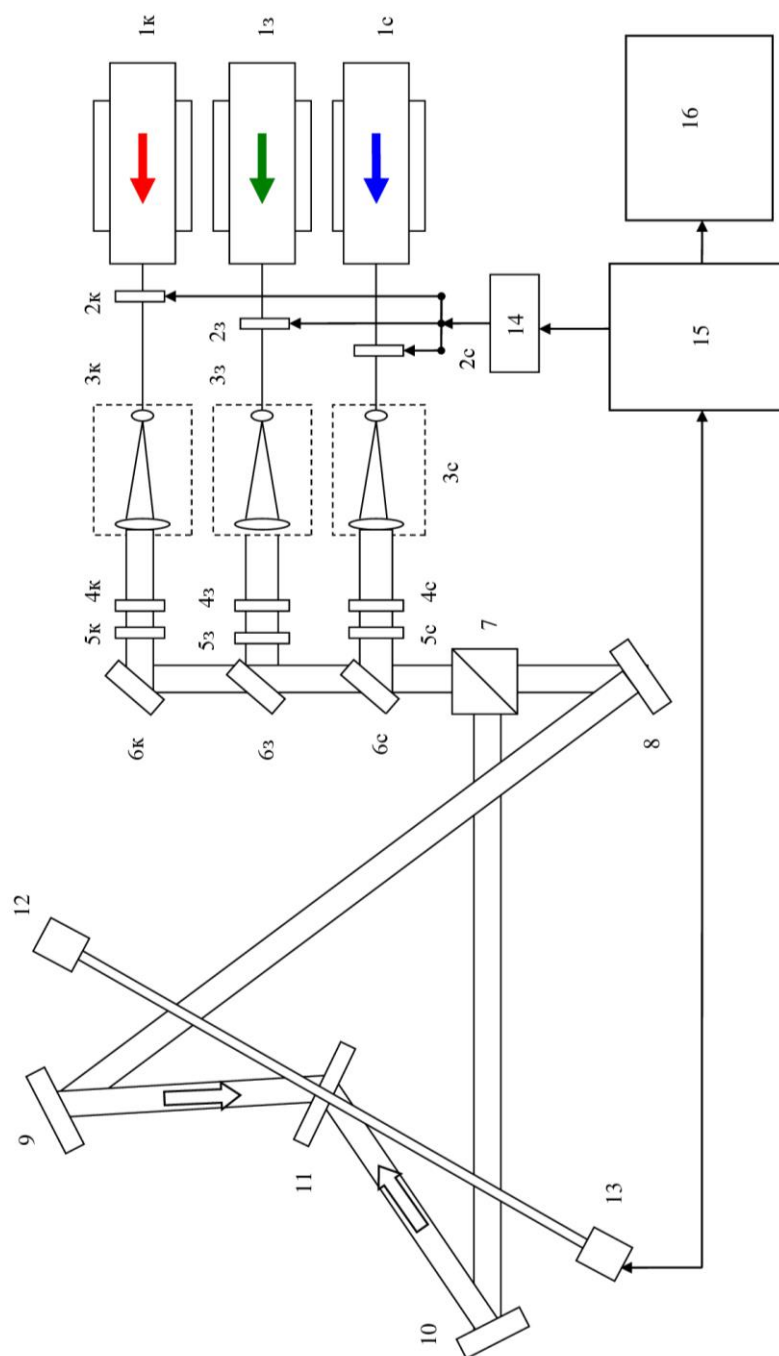
В работе использован базовый состав фотополимерной композиции (ФПК) на основе акриламидного мономера, поливинилацетата, а также новой фотоинициирующей системы [СС-СБ]. Количество нанесённой композиции определяло конечную толщину фотополимерного слоя, которая составляла 25 – 30 мкм. После улетучивания растворителя на фотополимерный слой накатывали защитную полиэтилентерефталатную плёнку, которая предотвращает доступ кислорода к фоточувствительному слою, а также защищает ГФПМ от механических повреждений и воздействий окружающей среды. Измерения толщин образцов проводились с помощью модернизированного интерференционного микроскопа МИИ-4.

## **3. Запись и характеристика объёмных отражательных голограмм**

Отражательные голограммы записывали на установке, структурная схема которой представлена на рис. 2.

Угол схождения контр-направленных пучков составлял  $110^\circ$  (в воздухе), соотношение их интенсивностей в плоскости записи  $\sim 1:1$ . Интенсивность излучения и энергию экспозиции регулировали с помощью нейтральных светофильтров и автоматизированных фотозатворов. После записи голограмм осуществлялась их пост-обработка.

Контроль динамики ДЭ голограмм осуществляли путем измерения спектра пропускания непосредственно в процессе записи с помощью цифрового спектрофотометра [17].

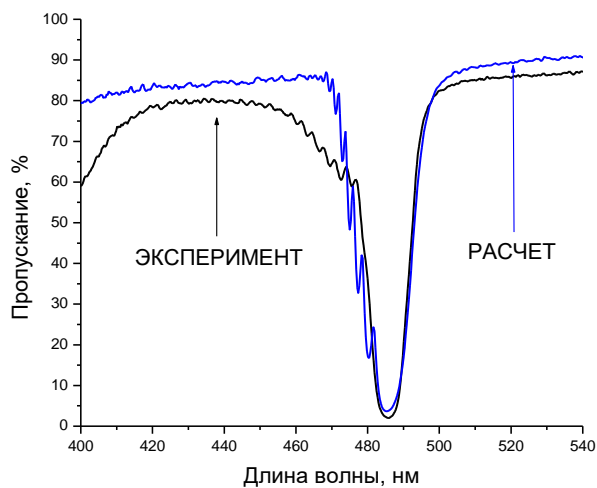


1с, 1з, 1к – лазеры с длинами волн излучения 457, 532 и 639 нм; 2с, 2з, 2к – автоматизированные фотозатворы; 3с, 3з, 3к – коллиматоры; 4с, 4з, 4к – диафрагмы; 5с, 5з, 5к – нейтральные светофильтры; 6к, 8, 9, 10 – плоские зеркала; 6з, 6с – дихроичные зеркала; 7 – светоделительный кубик; 11 – образец ГФПМ; 12 – галогенная лампа для формирования зондирующего пучка белого света; 13 – цифровой спектрофотометр; 14 – блок управления фотозатворами; 15 – компьютер; 16 – монитор.

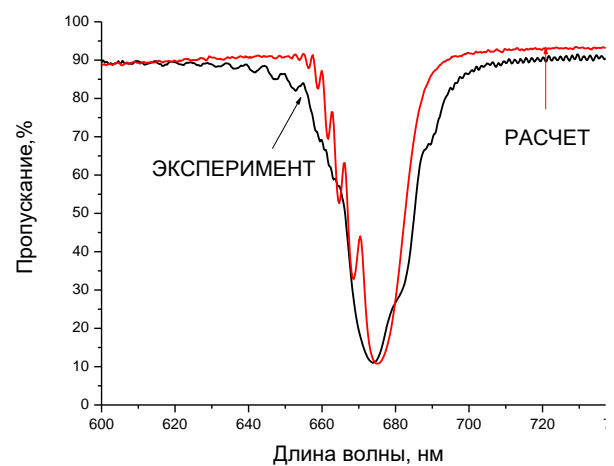
**Рис. 2.** Структурная схема установки записи объёмных отражательных голограмм

#### 4. Анализ экспериментальных данных

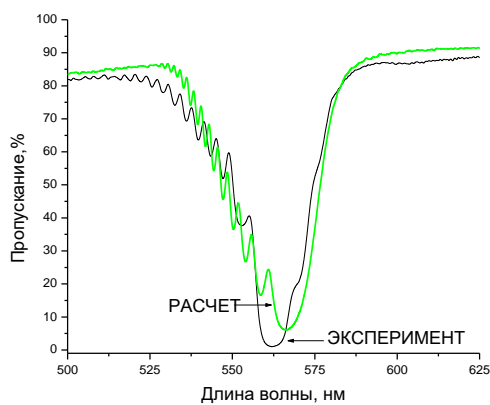
На рис. 3 показаны экспериментальные и расчетные кривые контуров спектрального отклика (рефлекса) образцов монохромных и цветной отражательных (рисунки а, б, в, г соответственно).



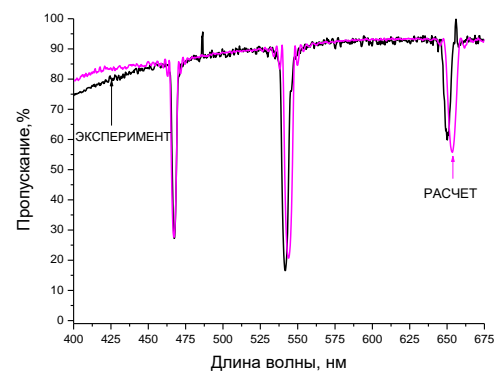
а)  $\lambda_{\text{рес}}=457$  нм



б)  $\lambda_{\text{рес}}=639$  нм



в)  $\lambda_{\text{рес}}=532$  нм



з)  $\lambda_{\text{рес}}= 639, 532, 457$  нм

**Рис. 3.** Экспериментальные и расчетные графики спектров пропускания отражательных монохромных (а, б, в) и цветных (г) голограмм с толщинами слоев 25 – 30 мкм

Экспериментальные значения ДЭ отражательных голограмм оценивали с помощью формулы:

$$\eta_r = (1 - T_r/T_0) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $T_r$  – пропускание голограммы на длине волны максимума спектрального отклика,  $T_0$  – остаточное пропускание образца ГФПМ вне участка голограммы.

Расчетные кривые построены с использованием известных формул Когельника [18,19], описывающих дифракционную эффективность и спектральную селективность объёмных отражательных голограмм. Наибольшая ширина спектрального отклика (рефлекса) на полувывоте для голограммы, полученной в синей области спектра, составляет ~ 30 нм. Для спектров монохромных голограмм отмечено отсутствие боковых лепестков контура селективности, что указывает на неравномерное распределение амплитуды модуляции показателя преломления по глубине голограммы, а также нарушение периодичности и

направления вектора решётки [19]. Характеристики записанных отражательных голограмм с разными толщинами приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

$\lambda_{\text{зап}}, \text{ нм}$	$T, \text{ мкм}$	$P, \text{ мВт/см}^2$	$E, \text{ мДж/см}^2$	ДЭ, %	$\lambda, \text{ теор., нм}$	$\lambda, \text{ эксп., нм}$	$S_{\text{eff}}, \%$	$\Delta n$
457	25	4	30	98	493	486	1.4	0.04
532	30	12	50	98	574	561	2.2	0.04
639	30	40	400	89	690	673	2.8	0.03
Цветная	25	$P_{457}=4$ $P_{532}=12$ $P_{639}=40$	$E_{457}=40$ $E_{532}=15$ $E_{639}=150$	$\text{ДЭ}_{457}=67$ $\text{ДЭ}_{532}=81$ $\text{ДЭ}_{639}=35$		$\lambda_{457}=467$ $\lambda_{532}=541$ $\lambda_{639}=649$	$S_{\text{eff},457} \approx 5.3$ $S_{\text{eff},532} \approx 5.7$ $S_{\text{eff},639} \approx 5.9$	$\Delta n_{457} \approx 0.005$ $\Delta n_{532} \approx 0.012$ $\Delta n_{639} \approx 0.01$

Наличие протяжённого длинноволнового плеча в спектре поглощения КПЗ позволяет проводить запись голограммы излучением на длине волны 639 нм, обеспечивая, тем самым, три цвета голограммы. Из таблицы 1 видно, что с возрастанием длины волны излучения для достижения высокой ДЭ голограммы в ГФПМ на основе КПЗ СС-СБ необходимо увеличивать мощность и энергию засветки. Монохромные голограммы обладают ДЭ более 90%, и модуляция коэффициента преломления ГФПМ составляет 0.03 – 0.04. В случае записи трехцветной голограммы суммарная модуляция коэффициента преломления достигает ~0.03. Установлено также, что дифракционная эффективность спектральных откликов цветной голограммы зависит от очередности засветки лазерами с различными длинами волн, а эффективная усадка  $S_{\text{eff}}$  возрастает при увеличении длины волны записи и периода голографической решетки.

### Заключение

На основе фоточувствительного комплекса с переносом заряда на основе соли сульфония и бората получен однослойный голографический фотополимерный материал, позволяющий проводить запись монохромных и цветных объёмных отражательных голограмм с помощью лазеров, излучающих в красном, зеленом и синем диапазонах видимого спектра.

Определены характеристики монохромных голограмм с высокой модуляцией показателя преломления  $\Delta n \approx 0.03 - 0.04$ , которая обеспечивает ДЭ  $\approx 98\%$  при толщине регистрирующего слоя  $\approx 25 - 30$  мкм. Для трехцветных голограмм суммарная модуляция коэффициента преломления ГФПМ составляет  $\approx 0.03$ . Полученные голограммы имеют высокую прозрачность (70 – 95%) во всём видимом диапазоне.

### Список использованной литературы

- [1] Vorzobova, N. Application of Photopolymer Materials in Holographic Technologies / N.Vorzobova, P. Sokolov // Polymers. — 2019. — Vol 11. — P. 2020.



- [2] **kbari, H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications / H.Akbari, I.Naydenova, S.Martin // *Appl. Opt.* — 2014. — Vol 53. — 1343–1353
- [3] **Bruder, F.-K.** Precision Holographic Optical Elements in Bayfol HX Photopolymer / Bruder, F.-K. Bang H., Fäcke T. et al. // *Proc. of SPIE.* — 2016. — Vol 9771. — P. 977103
- [4] **Gambogi, W.J.** Advances and Applications of DuPont Holographic Photopolymers / W.J.Gambogi, Weber and A. M., Trout T. J. // *Proc SPIE.* — 1993. — Vol 2043. — P. 2-13
- [5] **Bruder, F.-K.** The Chemistry and Physics of Bayfol HX Film Holographic Photopolymer / Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. // *Polymers.* — 2017. — 9. — № 10. — P. 472–494
- [6] **Alim, M. D.** High Dynamic Range ( $\Delta n$ ) Two-Stage Photopolymers via Enhanced Solubility of a High Refractive Index Acrylate Writing Monomer / M. D.Alim, D. J. Glugla, S. Mavila, et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* — 2017. — Vol 10. — P.1217–1224.
- [7] **Yunfeng Hu.** Holographic Photopolymer Material with High Dynamic Range ( $\Delta n$ ) via Thiol–Ene Click Chemistry / Yunfeng Hu, Benjamin A. Kowalski, Sudheendran Mavila, et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* — 2020. — Vol 12. — P.44103
- [8] **Ahmad Ibrahim** High Performance Photoinitiating Systems for Holography Recording: Need for a Full Control of Primary Processes/ Ahmad Ibrahim, Xavier Allonas, Christian Ley, Koichi Kawamura, Horst Berneth, Friedrich-Karl Bruder, Thomas Fäcke, Rainer Hagen, Dennis Hönel, Thomas Rölle, Guenther Walze, and Marc Stephan Weiser // *Chem. Eur. J.* 2014, 20, 15102 – 15107
- [9] Pat.2014/0127611 A1 US, CPC G 03 H 1/02. /Samsung electronics Co., Pub. 08.05.2015.
- [10] **Ibrahim A.** PCCP Physical Chemistry Chemical Physics Accepted Manuscript ARTICLE Please do not adjust margins Please do not adjust margins Tailoring hybrid three component photoinitiating system for 3D printing / Ibrahim A., Ley C., Allonas X., Carre C., Pillin I. // *J. Displ. Technol.* 2014. V. 10. P. 456.
- [11] **Ahmad Ibrahim** et al. High-Performance Photoinitiating Systems for Free Radical Photopolymerization. Application to Holographic Recording Photochemistry and Photobiology, 2013, 89: 1283–1290
- [12] **Shelkovnikov V.V.** Monochrome and two-color holograms in layered photopolymer materials // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 404–412
- [13] **D. Wang, P.** Indole-based charge transfer complexes as versatile dual thermal and photochemical polymerization initiators for 3D printing and composites / D. Wang, P. Garra, J. P. Fouassier, B. Graff, Y. Yagci, J. Lalevee // *Polym. Chem.* 2019, 10, 4991–5000
- [14] **Деревянко Д.И.** Тонкослойные голографические фотополимерные материалы с большим изменением показателя преломления / Д.И. Деревянко, Е.Ф. Пен, В.В. Шелковников, С.И. Алиев // *Автометрия.* — 2021. — Т. 57. № 6 с.29–37.
- [15] **Шелковников В.В.** Новые фотогенераторы кислоты на основе сульфониевых производных тиоксантен-9-она для детритилирования в процессе синтеза

олигонуклеотидов / Шелковников В.В., Лоскутов В.А., Васильев Е.В. и др. // Известия Академии Наук. Серия химическая, 2011, №3, с.548

- [16] **Pommerening P.** Synthesis of a Chiral Borate Counteranion, Its Trityl Salt, and Application Thereof in Lewis-Acid Catalysis / Pommerening P., Mohr J., Friebe J., Oestreich M. // Eur. J. Org. Chem. 2017, V.017, I.16, P.2312–2316
- [17] **Бабин С.А.** Методы и устройства тестирования голографических фотополимерных материалов / С.А. Бабин, Е. В. Васильев, В.И. Ковалевский и др. //Автометрия. — 2003. — № 2. — С. 57-70.
- [18] **Kogelnik H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings / H. Kogelnik //The Bell System Technical Journal. —1969. — Vol. 48. —№ 9. —P. 2909–2947.
- [19] **Kogelnik H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings / H. Kogelnik //The Bell System Technical Journal. —1969. — Vol. 48. —№ 9. —P. 2909–2947.

## **Recording monochrome and color holograms in photopolymer material using charge-transfer borate-sulfonium complex**

*D. I. Derevianko<sup>1</sup>, E. F. Pen<sup>2</sup>, V. V. Shelkovnikov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

Monochrome and color (blue-green-red) volume reflection holograms were obtained using single-layer photopolymer materials with new photoinitiating system based on sulfonium and borate salts. The values of the color holograms diffraction efficiency ~ 30 – 80% and the monochrome holograms 90 – 95% were achieved.

*Keywords:* Photopolymers, Refractive index modulation, Reflection holograms, Color holography.

# Гибридный амин-акрилат-тиол-силоксановый фотополимерный материал для записи микроструктур при повышенной влажности окружающей атмосферы

С. И. Алиев<sup>1,2</sup>, Д. И. Дервянко<sup>1</sup>, В. В. Шелковников<sup>1,2</sup>, В. Н. Бережная<sup>1</sup>, И.К. Шундрина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

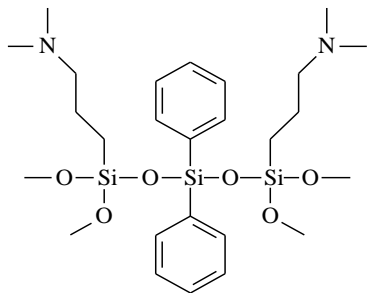
Проведена модификация гибридного кремний-органического материала амин-силоксановым соединением. Это позволило получить прозрачные пленки при влажности окружающей атмосферы 40 %. Были измерены термомеханические свойства фотоотверждённых плёнок с добавкой амин-силоксанового соединения методом ДМА. При влажности окружающей атмосферы 40 % были получены микроструктуры с периодом  $d \approx 1,5$  мкм и толщиной  $T \approx 1$  мкм.

*Ключевые слова:* Гибридный фотополимерный материал, Дифракционные оптические элементы, Голография.

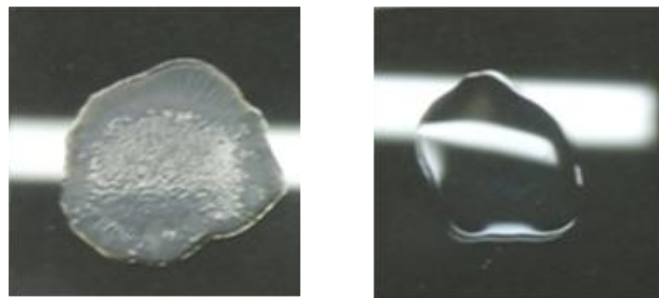
*Цитирование:* Дервянко, Д. И. Гибридный амин-акрилат-тиол-силоксановый фотополимерный материал для записи микроструктур при повышенной влажности окружающей атмосферы / С. И. Алиев, Д. И. Дервянко, В. В. Шелковников, В. Н. Бережная, И. К. Шундрина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. —Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 330–333.

Развитие оптической промышленности связано с использованием элементов дифракционной и интегральной оптики, как ключевыми компонентами при конструировании новых приборов и систем. Для их создания широкое распространение получили фоторезистивные гибридные кремнийорганические материалы (ФГКМ) [1].

В [2] был получен ФГКМ на основе тетраакрилатного мономера (ТА) и тиол-силоксановых соединений (ТС). Однако синтезированные ТС были неустойчивы к гидролитической конденсации, что накладывало ограничения на получение прозрачных пленок при влажности окружающей атмосферы более 30 % [3]. Модификация ФГКМ амин-силоксановым соединением (АС), структурная формула приведена на рис. 1., позволила получить прозрачные пленки при влажности окружающей атмосферы 40 % (рис. 2.).



**Рис.1.** Структурная формула амин-силоксанового соединения



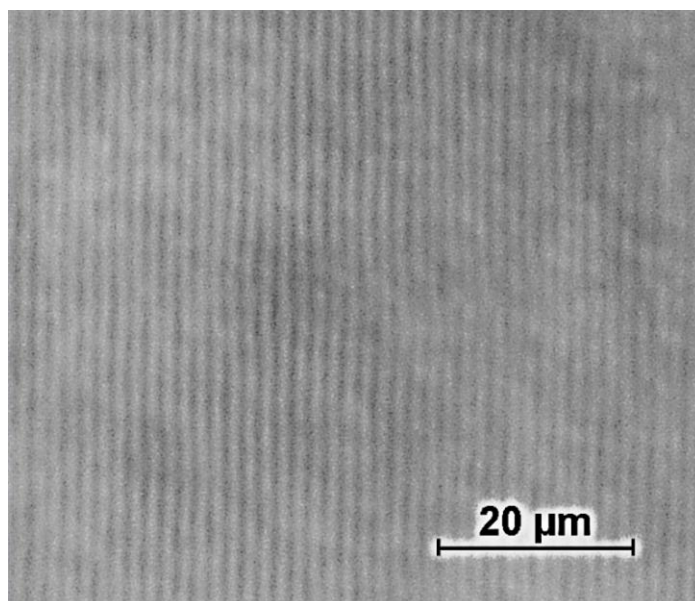
**Рис.2.** Фотографии неотвержденных гибридных пленок а) без добавления АС б) с добавлением АС.

Методом ДМА были измерены термомеханические свойства фотоотвержденных пленок ФГКМ с различными соотношениями ТА:ТС:АС. Полученные значения модуля упругости ( $E'$ ) и температуры стеклования ( $T_c$ ) плёнок в сравнении с фоторезистом SU-8, модуль упругости которого варьируются в зависимости от дозы УФ излучения и условий термообработки [4], представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Термомеханические свойства гибридных плёнок с различными соотношениям ТА:ТС:АС

Соотношение ТА:ТС:АС	$E'$ , МПа	$T_c$ , °C
1:0,75:0,25	1241	75
1:0,5:0,5	1027	60
1:0,25:0,75	656	40
SU-8	700-2700	50-200

При влажности окружающей атмосферы 40 %, с помощью голографической записи, на плёнке (ТА:ТС:АС = 1:0.5:0.5) были получены микроструктуры с периодом  $d \approx 1,5$  мкм и толщиной  $T \approx 1$  мкм.



**Рис. 3.** Фотография голографической решётки

В результате модификация ФГКМ амино-силоксановым соединением позволила получить прозрачные плёнки при влажности окружающей атмосферы 40 %. Методом ДМА показано, что с увеличением концентрации АС значения  $E'$  и  $T_c$  уменьшаются с 1241 МПа до 656 МПа и с 75 °С до 40 °С соответственно. Продемонстрирована возможность записи микроструктур с при влажности окружающей атмосферы 40 %.

#### **Список источников**

- [1] Micro resist technology GmbH / URL: <https://www.microresist.de>
- [2] **Shelkovnikov, V.** Synthesis and thermomechanical properties of hybrid photopolymer films based on the thiol-siloxane and acrylate oligomers / V. Shelkovnikov, L. Ektova, N. Orlova, L. Ogneva, D. Derevyanko, I. Shundrina, G. Salnikov, L. Yanshole // Journal of Materials Science. — 2015. — Vol 50. — № 23. — P. 7544–7556.
- [3] **Деревянко, Д. И.** Гибридный фотополимерный материал на основе (8-акрилоил-1,4-дитиа-8-азаспиро[4.5]декан-2-ил)метил акрилата и тиол-силоксанового компонента для записи микроструктур: синтез, оптические и термомеханические свойства / Д. И. Деревянко, В. С. Басистый, В. В. Шелковников, И. К. Шундрина, А. Д. Бухтоярова, Г. Е. Сальников, В. Н. Бережная, А. А. Черноносков // Высокомолекулярные соединения — 2020. — Том 62. — № 5. — С. 382–394.
- [4] R. Feng, R.J. Farris // Micromech. Microeng. — 2003. — Vol 13. — P. 80.

# Hybrid amine-acrylate-thiol-siloxane photopolymer material for recording microstructures at high atmospheric humidity

*S. I. Aliev<sup>1</sup>, D. I. Derevianko<sup>2</sup>, V. V. Shelkovnikov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The hybrid silicon-organic material was modified with an amine-siloxane compound. This made it possible to obtain transparent films at a humidity of the surrounding atmosphere of 40%. The thermomechanical properties of photocured films with the addition of an amine-siloxane compound were measured by the DMA method. At an ambient humidity of 40 %, microstructures with a period  $d \approx 1.5 \mu\text{m}$  and a thickness  $T \approx 1 \mu\text{m}$  were obtained.

*Keywords:* Hybrid photopolymer material, Diffractive optical elements, Holography.

# Антраценосодержащий полимерный материал с фенантренхиноном для формирования тонких и объемных голограмм

В. В. Могильный<sup>1</sup>, Э. А. Храмцов<sup>1,2</sup>, А. П. Шкадаревич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, Республика Беларусь

Исследовано формирование тонких и объемных голографических дифракционных решеток в новом антраценосодержащем полимерном материале с фенантренхиноном в качестве светочувствительного компонента. Запись объемных голографических дифракционных решеток проводилась в материале с толщиной порядка 10 мкм лазерным излучением с длиной волны 532 нм и получена максимальная дифракционная эффективность порядка 9%. Запись рельефных голографических дифракционных решеток проводилась в материале с толщинами порядка 1 мкм с последующей обработкой в жидком углеводороде за счет обратимой пластификации. Максимальная амплитуда рельефа составила порядка 25% от толщины регистрирующего материала, а дифракционная эффективность до 20%.

*Ключевые слова:* Сенсibilизированное фотоокисление, Фенантренхинон, Антрацен, Полимерный фотоматериал, Рельефная голографическая дифракционная решетка.

*Цитирование:* Могильный, В. В. Антраценосодержащий полимерный материал с фенантренхиноном для формирования тонких и объемных голограмм / В. В. Могильный, Э. А. Храмцов, А. П. Шкадаревич // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 334–336.

## Введение

Эффект фотоокисления молекул антрацена в полимерной матрице используется при записи объемных голограмм в материале Реоксан, разработанном в ГОИ им.С.И.Вавилова [1]. Для генерации синглетного кислорода в этом процессе применяются различные красители, оптическое поглощение которых перекрывает весь видимый диапазон спектра, что позволяет варьировать область спектральной чувствительности материала в широких пределах. Необходимость предварительного насыщения слоев Реоксана кислородом при высоком давлении создает технические трудности, а также ограничивает время, в течение которого регистрирующие слои сохраняют фоточувствительность. Молекулы антрацена и его пероксида, формирующие дифракционную структуру, обладают в полимерной матрице подвижностью, снижающей стабильность голограммы во времени [2] и исключающей применение ее жидкостной обработки. Если связать химически антраценовые структуры с макромолекулами при синтезе полимера и обеспечить хорошую проницаемость материала для атмосферного кислорода, то появляется возможность формировать стабильные фазовые голограммы в объеме слоя и проводить их жидкостную обработку без разрушения голографических структур [3].

В настоящей работе экспериментально изучено фотоокисление боковых антраценовых групп нового полимера с температурой стеклования около 338 К кислородом, поступающим в слой через границу с воздушной средой, при фотосенсибилизации процесса добавкой фенантренхинона. Фенантренхинон обладает хорошей растворимостью в полимере и создает фоточувствительность в сине-зеленой области спектра, обеспеченной рядом мощных лазерных источников излучения. Оптическое возбуждение вблизи максимума длинноволнового поглощения фенантренхинона ( $\sim 410$  нм) позволяет увеличить чувствительность материала в слое толщиной  $\sim 1$  мкм в 15 раз по сравнению со слоями с метиленовым синим в качестве фотосенсибилизатора. При однородном облучении слоев композиции с фенантренхиноном в спектральном диапазоне 408-532 нм изменение показателя преломления, измеренное с помощью волноводной методики, достигало величины - 0,02. Это позволило лазерным излучением  $\lambda = 532$  нм в слоях толщиной около 10 мкм записывать объемные голографические решетки с максимальной дифракционной эффективностью до 9 %.

Показана возможность использования механических напряжений в структуре голографических решеток в тонких слоях (1 мкм) для формирования периодических поверхностных фоторельефов (рельефно-фазовых голограмм). Поверхностные фоторельефы формируются после записи голографических решеток лазерным излучением в пределах длинноволнового поглощения фенантренхинона в процессе обработки жидким углеводородом (обратимая пластификация). Их максимальная амплитуда составляет около 25% толщины регистрирующего слоя. Несовершенство поверхности и несинусоидальность фоторельефа снижают достижимую при 100 % отражении дифракционную эффективность до значений менее 0,20.

### Список источников

- [1] Лашков Г. И. Перенос энергии с участием триплетных состояний в фазовой регистрации света // Успехи физических наук. — 1986. — Т. 148. — №. 3. — С. 539–541.
- [2] Вениаминов А. В. и др. Голографическая релаксометрия как метод исследования диффузионных процессов в полимерных регистрирующих средах // Оптика и спектроскопия. — 1986. — Т. 60. — №. 1. — С. 142–147.
- [3] **Могильный, В.В.** Фотоокисление антраценсодержащих полимеров атмосферным кислородом для объемно-фазовой и рельефно-фазовой голографической записи/ В.В. Могильный, А.И. Станкевич, Э. А. Храмцов, А. П. Шкадаревич // Взаимод. излучений с твердым телом: Материалы 14 Международной конференции. — Минск: БГУ.-2021. — С. 325–329.



# Anthracene-containing polymeric material with phenanthrenquinone for the formation of thin and volume holograms

*U. V. Mahilny<sup>1</sup>, E. A. Khramtsou<sup>1,2</sup>, A. P. Shkadarevich<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Unitary enterprise «STC «LEMT» of the BelOMO», Minsk, Republic of Belarus

The formation of thin and bulk holographic diffraction gratings in a new anthracene-containing polymer material with phenanthrenquinone as a photosensitive component has been studied. The recording of volumetric holographic diffraction gratings was carried out in a material with a thickness of about 10  $\mu\text{m}$  using laser radiation with a wavelength of 532 nm, and a maximum diffraction efficiency of about 9% was obtained. Relief holographic diffraction gratings were recorded in a material with a thickness of about 1  $\mu\text{m}$ , followed by processing in a liquid hydrocarbon due to reversible plasticization. The maximum amplitude of the relief was about 25% of the thickness of the recording material, and the diffraction efficiency was up to 20%.

*Keywords:* Sensitized photooxidation, Phenanthrenquinone, Anthracene, Polymeric photographic material, Embossed holographic diffraction grating.

# Структура трёхмерных голограмм, полученных в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц

*О. В. Андреева, В. А. Пономарёва, Н. В. Андреева, М. Г. Хохлов*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлена методика выделения проявленных частиц серебра из силикатного каркаса и получения разбавленных препаратов, пригодных для исследования оптическими методами.

*Ключевые слова:* Трёхмерные голограммы, Галогенидосеребряные среды, Нанопористые силикатные матрицы.

*Цитирование:* Андреева, О. В. Структура трёхмерных голограмм, полученных в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. —Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 337–340.

## Введение

Трёхмерные голограммы, регистрируемые в галогенидосеребряных светочувствительных средах с использованием процесса химико-фотографического проявления, как было показано в ряде публикаций [1], формируются в виде пространственного распределения коллоидных наночастиц металлического серебра преимущественно сферической формы. В настоящей работе рассмотрены трёхмерные голограммы в галогенидосеребряных средах на основе нанопористых силикатных матриц (НПСМ) [2] и предложена методика, позволяющая выделить частицы серебра из проявленного образца среды НПСМ/AgHal.

## 1. Приготовление препаратов

Изготовление препарата включает два основных этапа: измельчение исследуемой части образца до порошкообразного состояния; растворение порошка в водном растворе щелочи (КОН – 0,5 М).

Физические причины, обеспечивающие в этом случае получение препарата с равномерным распределением частиц металла по высоте столба жидкости:

- растворимость частиц силикатного каркаса в щелочи и химическая устойчивость по отношению к щелочи частиц металла;
- диффузия частиц металла в жидкости при освобождении из силикатного каркаса;
- равномерное распределение частиц металла в объеме жидкости за счет броуновского движения (Примечание: для частиц серебра диаметром менее 50 нм скорость перемещения в объеме жидкости за счет броуновского движения в несколько раз превышает скорость перемещения за счет процесса седиментации).

В то же время агломерация частиц металла и гелеобразование жидкой фазы являются отрицательными факторами. Жизненный цикл препарата с момента заливки порошка водным раствором щелочи включает следующие основные этапы:

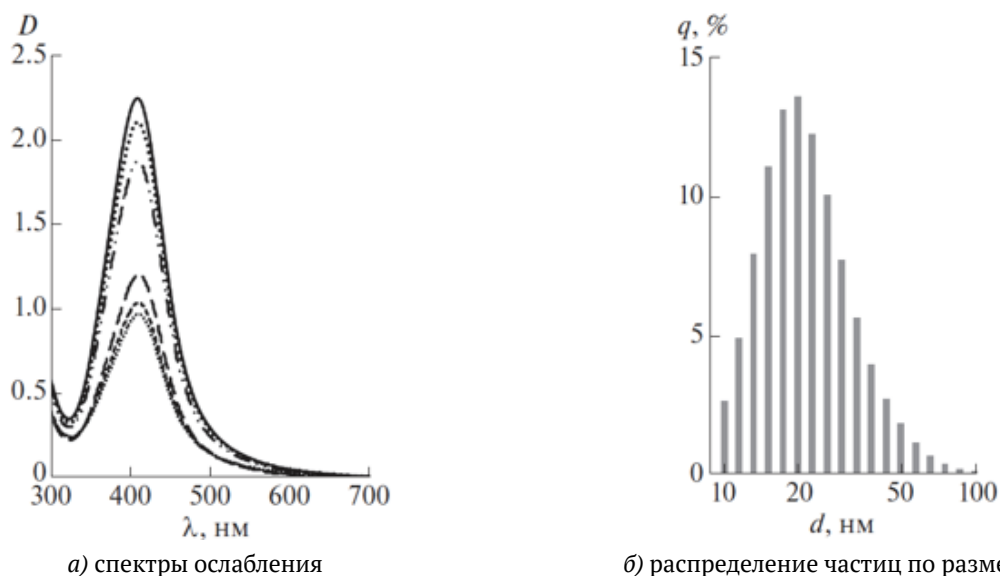
- растворение частиц каркаса и диффузия частиц металла в объеме жидкости;
- стабильное состояние ансамбля частиц металла в жидкости – именно на этом этапе возможно изучение структуры выделенных частиц;
- нарушение стабильности системы – увеличение размера частиц металла за счет агломерации и гелеобразование жидкой фазы – препарат мутнеет и становится непригодным для оптических измерений.

## 2. Приготовление препаратов

Для контроля параметров препаратов использованы два оптических метода: спектральные измерения на приборе Evolution 300 и измерения функции распределения частиц по размерам методом динамического рассеяния света на приборе Horiba LB-550.

Непосредственно после приготовления препарат представляет собой мутную жидкость слегка желтоватого оттенка. При хранении препарата жидкость становится прозрачной, а на дне емкости виден белый осадок, который с течением времени исчезает.

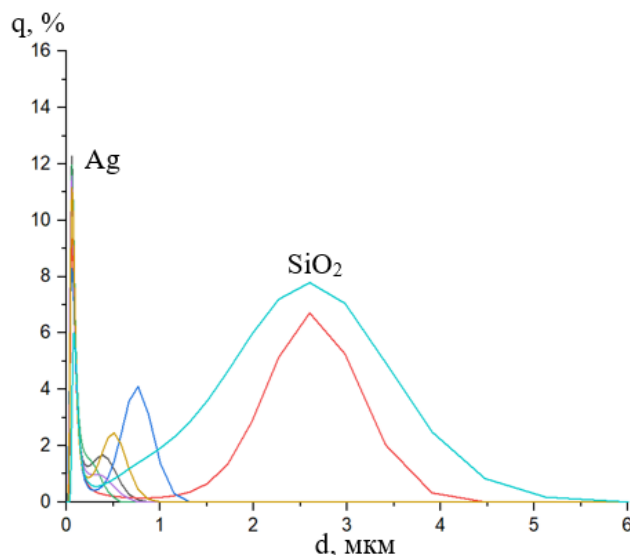
На рис.1а представлены спектры ослабления препарата в период 3–8 суток с момента изготовления препарата и его заливки в кювету спектрофотометра. Контроль характеристик производился на высоте (15–20) мм от дна кюветы и продолжался до установления стабильной концентрации частиц серебра в исследуемой части кюветы. Ярко выраженный максимум оптической плотности спектра ослабления на длине волны  $\sim 410$  нм ( $D_{\max}$ ), обусловленный плазмонным резонансом частиц металлического серебра, проявляется уже через сутки после изготовления препарата. С течением времени происходит увеличение  $D_{\max}$ , что свидетельствует об увеличении концентрации частиц серебра. Важным фактором является неизменность формы спектров ослабления при увеличении концентрации, что свидетельствует о стабильности характеристик ансамбля частиц, выделенных из силикатного каркаса.



**Рис. 1.** Спектры ослабления водной суспензии проявленных частиц серебра, выделенных из нанопористой матрицы, в период от 1 до 8 суток с момента изготовления препарата (а), распределение частиц по размерам в препарате после 8 суток (б)

Контроль, проведенный при стабильном состоянии препарата методом динамического рассеяния света, представлен на рис.1б в форме гистограммы, характеризующей распределение частиц по размерам.

Распределение частиц по размерам в препарате на этапе растворения каркаса приведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Распределение по размерам частиц серебра (Ag) и каркаса (SiO<sub>2</sub>) в препарате при его перемешивании после 5 суток хранения

В этом случае перед проведением измерений препарат был перемешан и показал наличие как наночастиц металлического серебра, Ag, так и наличие крупных частиц, относящихся к элементам каркаса, SiO<sub>2</sub>. Следует отметить, что на восьмой день хранения препарата после его перемешивания наблюдалось только стабильное распределение частиц

серебра при отсутствии более крупных частиц, что подтверждает данные спектральных измерений.

### **Заключение**

Анализ экспериментальных данных, полученных на ряде образцов с разной биографией позволил оценить временные промежутки этапов жизненного цикла исследуемых препаратов с момента их изготовления и определить рабочий режим использования препаратов для проведения исследований структуры ансамбля частиц металлического серебра, формирующих трехмерную голограмму. Для использованных образцов этот режим составляет период от 7 до 38 суток после изготовления препарата.

Предложенная методика при соответствующей модификации может быть использована и в ряде других случаев, таких как: выделение металлических частиц, сформированных внутри свободного объема пор силикатной матрицы разными способами, например при пропитке НПСМ солями металла с последующим восстановлением металла. А также может быть использована для выделения неорганических частиц, сформированных в свободном объеме пор силикатных матриц при условии их химической устойчивости к воздействию щелочи.

### **Список источников**

- [1] **Андреева О. В.** Плазмонные частицы коллоидного серебра в высокоразрешающих регистрирующих средах / Н. В. Андреева, Т. Б. Кузьмина // Оптика и спектроскопия. — 2017. — Т. 122. — № 1. — С. 58–65.
- [2] **Андреева О. В.** Нанопористые силикатные матрицы для голографии и биомедицины / Е. П. Быков, А. О. Исмагилов, А. Pandya, И. Ю. Щелканова, Н. В. Андреева // Оптика и спектроскопия. — 2021. — Т. 129. — № 4. — С. 418–426.

## **The structure of volume holograms recorded in silver halide media on basis of nanoporous silicate matrices**

*O. V. Andreeva, V. A. Ponomaryova, N. V. Andreeva, M. G. Khokhlov*  
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The technique for researching the structure of holograms formed by metallic silver nanoparticles using photographic process is presented. The technique is based on separation of metal particles from a silicate framework by dissolving it and forming aqueous suspensions of silver particles, the research of which by optical methods allows us to obtain information about the parameters of the developed particles.

*Keywords:* Volume holograms, Silver halide media, Nanoporous silicate matrices.

# Голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления

Д. И. Деревянко<sup>1</sup>, Е. Ф. Пен<sup>2</sup>, В. В. Шелковников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Разработан голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления. Получены объёмные отражательные и пропускающие голограммы, демонстрирующие первый и второй порядки дифракции с высокой равной дифракционной эффективностью (~80 % для отражающих и 50% для пропускающих голограмм).

*Ключевые слова:* Фотополимерные голограммы, Нелинейность модуляции показателя преломления.

*Цитирование:* Деревянко, Д. И. Голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 341–345.

## Введение

В настоящее время голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) благодаря своим характеристикам и простоте пользования нашли практическое применение в изобразительной и защитной голографии, интегральной оптике, дисплеях дополненной реальности, сенсорах [1-3].

В результате реакции фотополимеризации в ГФПМ происходит пространственная модуляция показателя преломления в соответствии с картиной засветки, имеющая вид синусоидального распределения в случае элементарных голографических решёток [4]. Однако на практике, в силу нелинейности физико-химических процессов формирования этих решёток на стадиях записи и постобработки голограмм результирующий профиль показателя преломления может существенно отличаться от синусоидального [5-7]. Данное обстоятельство приводит к появлению высоких порядков дифракции в пропускающих и отражательных голографических решётках [8].

Известны разработки, целенаправленно использующие данный эффект для создания планарных световодов [9]. Так, например, в [8] сообщается о дифракционной эффективности ~17% во втором порядке дифракции в объёмных пропускающих решётках на фотополимерах Bayfol NX (Bayer Material-Science AG, Германия).

Целью данной работы является исследование возможностей формирования в ГФПМ, синтезированных в НИОХ СО РАН, отражательных и пропускающих голограмм с высокой дифракционной эффективностью в первом и втором порядках дифракции.

## **2. Основная часть**

### **2.1. Фотополимерная композиция**

В работе применялись ГФПМ, разработанные в НИОХ СО РАН, чувствительные в красной области спектра и описанные в [10,11], содержащие следующие основные компоненты: растворители, полимерное связующее (поливинилацетат), краситель Метиленовый Голубой, соинициатор, акриламидный мономер (АМ). Концентрацию красителя подбирали с учётом рекомендаций [12] таким образом, чтобы пропускание на длине волны записи лазерного излучения составляло 35–45 %. До экспонирования на фотополимерный слой накатывали защитную полиэтилентерефталатную плёнку, которая предотвращает доступ кислорода к фоточувствительному слою, а также служит для защиты ГФПМ от механических повреждений и воздействий окружающей среды. На основе данной композиции получены образцы толщиной 20 – 30 мкм.

### **2.2. Режимы записи и пост-обработки фотополимерных голограмм.**

Отражательные и пропускающие фотополимерные голограммы записывали с использованием известных двухпучковых схем и лазера с длиной волны излучения 639 нм [13]. Пространственные частоты объёмных отражательной и пропускающей решёток составляли  $\approx 4400$  л/мм и 1000 л/мм (углы схождения записывающих пучков соответственно 110 и 37 градусов в воздухе). Интенсивность излучения в одном пучке составляла 1.3 мВт/см<sup>2</sup>, а энергия экспозиции – 30 мДж/см<sup>2</sup>. После записи голограммы закрепляли путём пост-экспонирования всего образца галогенной лампой.

Характеризация полученных голограмм включала в себя измерение контура угловой селективности пропускающих голограмм и спектра пропускания отражательных голограмм, оценку величин их дифракционной эффективности, модуляции показателя преломления. Указанные измерения и оценки параметров (представленные ниже) проводились с помощью ранее разработанных нами методик и стендов [14,15].

## **3. Анализ экспериментальных данных.**

На рис. 1 показаны экспериментальные (1) и расчетные (2) кривые контуров спектрального отклика (рефлекса) образцов отражательной голограммы с толщинами  $T \approx 20 - 30$  мкм, изготовленных в соответствии с ранее описанной процедурой записи и постобработки. Хорошо видны узкие провалы, обусловленные брэгговским отражением света, причём наряду с отражением (рефлексом) на длине волны  $\lambda_1 \sim 722$  нм, соответствующим основной решётке, присутствует рефлекс на длине волны  $\lambda_1 \sim 370$  нм, принадлежащий второй гармонике пространственного распределения показателя преломления. Отметим, что вопреки ожиданиям, длина волны второй гармоники не равна половине длины волны рефлекса

основной решетки. Данное обстоятельство находит объяснение при учете дисперсии показателя преломления при расчете эффективной усадки ГФПМ, имеющей место в процессе записи и постобработки голограмм [8].

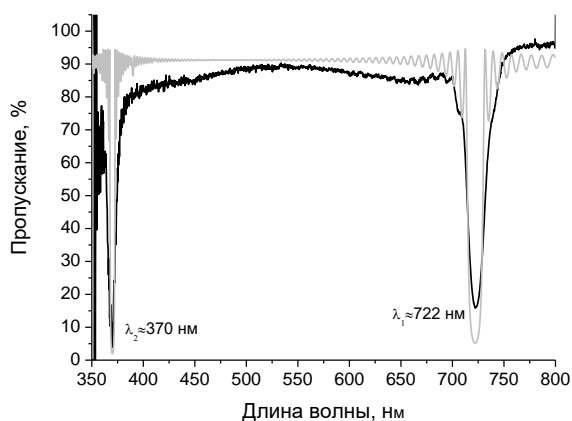


Рис. 1. Экспериментальные (—) и расчетные (---) графики спектров пропускания отражательных голограмм

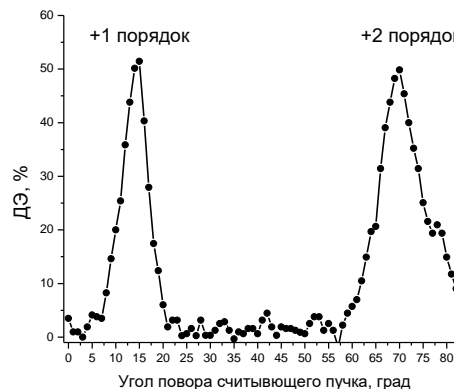


Рис. 2. Экспериментальный график контура угловой селективности пропускающих голограмм

На рис.2 изображены графики контуров угловой селективности +1 и +2 порядков пропускающей голограммы. Видно, что ДЭ этих порядков примерно равны и составляют 50% каждый. При расчетах предполагалось, что толщина решёток 20 мкм. Характеристики записанных голограмм приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Вид голограммы	ДЭ1, %	ДЭ2, %	FWHM1, нм	FWHM2, нм	$\Delta n1$	$\Delta n2$
Отражательная	~ 80	~ 90	16 нм	7 нм	~ 0.013	~ 0.013
Пропускающая	~ 50	~ 50	6 градусов	10 градусов	~ 0.008	~ 0.008

Длина волны рефлекса основной решётки  $\lambda_{r1}=722$  нм, ширина контура  $FWHM_{r1} \sim 16$  нм (по уровню 50 % от его глубины).  $\lambda_{r2}=370$  нм,  $FWHM_{r2}= 7$  нм; дифракционная эффективность и модуляция показателя преломления основной решётки и её второй гармоники составили примерно 80% и 0.013 соответственно.

Высокие значения дифракционной эффективности указывают на большую нелинейность модуляции показателя преломления разработанного ГФПМ, которая связана со скоростью полимеризации и диффузией мономера [16] Выявление связи скорости полимеризации и диффузией мономера и их влияния на природу высокой нелинейности модуляции коэффициента преломления ГФПМ требует дополнительных исследований и является предметом дальнейших исследований.



## Заключение

Найдены режимы записи и постобработки отражательных и пропускающих голограмм в ГФПМ, синтезированных в НИОХ СО РАН, обеспечивающие высокую дифракционную эффективность в первом и втором порядках дифракции. Экспериментально зарегистрированы рефлексы основных решёток, а также их вторых гармоник соответственно на длине волны 722 нм и 370 нм, их ДЭ составила ~ 80 %. Для пропускающей решетки ДЭ в первом и втором порядках ~ 50 %.

## Список источников

- [1] **Vorzobova N.** Application of Photopolymer Materials in Holographic Technologies / Vorzobova N., Sokolov P. // Polymers. — 2019. — 11. — 2020.
- [2] **Bruder F.-K.,** Bang H., Fdcke T. Precision Holographic Optical Elements in Bayfol HX Photopolymer/ Bruder F.-K., Bang H., Fdcke T. // Proc. of SPIE. — 2016. — 9771. — P. 977103.
- [3] **Akbari H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications/ Akbari H., Naydenova I., Martin S. // Appl. Opt. — 2014. — 53. — P. 1343–1353.
- [4] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings// The Bell Syst. Tech. J. — 1969 —48—2909.
- [5] **Zhao G.** Angular responses of the first and second diffracted orders in transmission diffraction grating recorded on photopolymer material / Zhao G., Mourolis P.// Opt. Commun. — 1995—P. 115–528.
- [6] **Neipp C.** Angular responses of the first and second diffracted orders in transmission diffraction grating recorded on photopolymer material/ C. Neipp, A. Beléndez, S. Gallego, M. Ortuño, I. Pascual, J. T. Sheridan // Optics Express—2003.—11.—16.— 1835.
- [7] **Massenot S.** of the dynamic formation of transmission gratings recorded in photopolymers and holographic polymer-dispersed liquid crystals / Massenot S., Kaiser J.-L., Chevallier R., Renotte Y. // Appl. Opt. — 2004— 43—5489.
- [8] **Пен Е. Ф.** Экспериментальное исследование рефлексов высоких порядков от объёмных отражательных голографических решёток //Квантовая электроника. — 2018.— 48.—6.—545.
- [9] **Bruder F.** Diffractive optics with high Bragg selectivity: volume holographic optical elements in Bayfol® HX photopolymer film / Friedrich-Karl Bruder; Thomas Fäcke; Rainer Hagen; Dennis Hönel; Enrico Orselli; Christian Rewitz; Thomas Rölle; Günther Walze // Proc. SPIE.—2015.— 9508.—9508G-1.
- [10] **Шелковников, В.В.,** Васильев Е.В., Пен Е.Ф., Твердохлеб П.Е. Развитие голографических фотополимерных материалов и метод их исследований / Шелковников В.В., Васильев Е.В., Пен Е.Ф., Твердохлеб П.Е. // Сб. тр. Всеросс. Семинара «Юрия Николаевича Денисюка - основоположник отечественной голографии». С.-Пб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2007. С. 241-261.
- [11] **Патент РФ № 2552351.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне /В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев и др., — Опубл. 10.06.2015.
- [12] **Shelkovnikov, V. V.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials / Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Kovalevsky V. I. // Opt. Mem. Neural Networks. — 2007.— 16.—2.—P. 75–83.
- [13] **Деревянко, Д. И.** Тонкослойные голографические фотополимерные материалы с большим изменением показателя преломления / Д.И. Деревянко, Е.Ф. Пен, В.В. Шелковников, С.И. Алиев // Автометрия.— 2021.— Т. 57.—№ 6.— с.29–37.].
- [14] **Бабин, С. А.** Методы и устройства тестирования голографических фотополимерных материалов / С.А. Бабин, Е. В. Васильев, В.И. Ковалевский Методы //Автометрия. — 2003.—№ 2.—С. 57–70;

- [15] **Пен, Е.Ф.** Регистрация и анализ характеристик угловой селективности голограмм в фотополимерных материалах / Пен Е.Ф., Вьюхина Н.Н., Твердохлеб П.Е., Васильев Е.В., Дервянко Д.И., Шелковников В.В., Алиев С.И. // Приборы и техника эксперимента. — 2022.—№2.— С. 99–108
- [16] **Colvin, V. L.** Quantitative model of volume hologram formation in photopolymers /V. L. Colvin, R. G. Larson, A. L. Harris, and M. L. Schilling //Journal of Applied Physics. — 1997.— P. 81–5913.

## **Holographic photopolymer material with high non-linearity modulation of the refractive index**

*D. I. Derevianko<sup>1</sup>, E. F. Pen<sup>2</sup>, V. V. Shelkovnikov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

Developed photopolymer material with a large nonlinearity of refractive index modulation. Volume reflective and transmissive holograms were obtained. The holograms have the first and second order of diffraction with a high equal diffraction efficiency (~ 80% for reflective and 50% for transmissive holograms).

*Keywords:* Photopolymer holograms, Nonlinearity of refractive index modulation.

# Модификация лазерным воздействием оптических свойств фоточувствительного детектора газоанализатора

*А. А. Ольхова, А. А. Патрикеева, И. Г. Зайцев, М. М. Сергеев*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

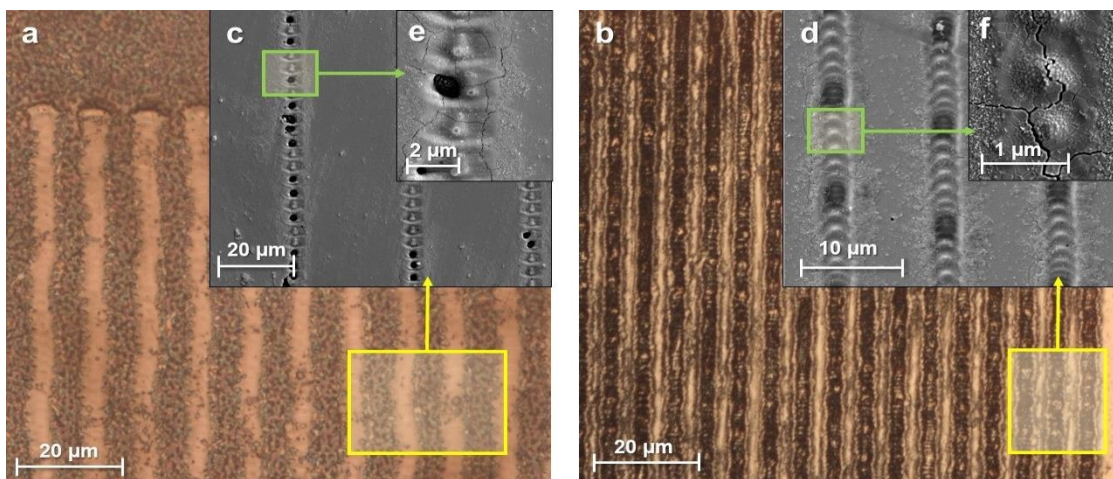
В работе исследован результат лазерного воздействия на пленки PbSe в режиме сканирования непрерывным и импульсным излучением с длиной волны 405 нм и 1064 нм. В результате фототермического воздействия на структуру пленки ее отражение и пропускание изменялись в спектральном диапазоне 0,3 - 1,0 мкм. При повышенной плотности мощности наблюдалось фотообесцвечивание материала и его плавление с последующим разрушением, приводящим к образованию микротрещин. При уменьшении плотности мощности наблюдалось фотопотемнение пленки в области лазерного воздействия. Для модифицированных участков пленки в этом случае наблюдалось резкое уменьшение пропускания и отражения, по своим оптическим характеристикам она приближалась к абсолютно черному телу. Данная модификация пленки особо перспективна для фотодетектирования органических молекул в виде газовой смеси.

*Ключевые слова:* Газовый анализ, Халькогенидные пленки, Фоточувствительность, Лазерная модификация.

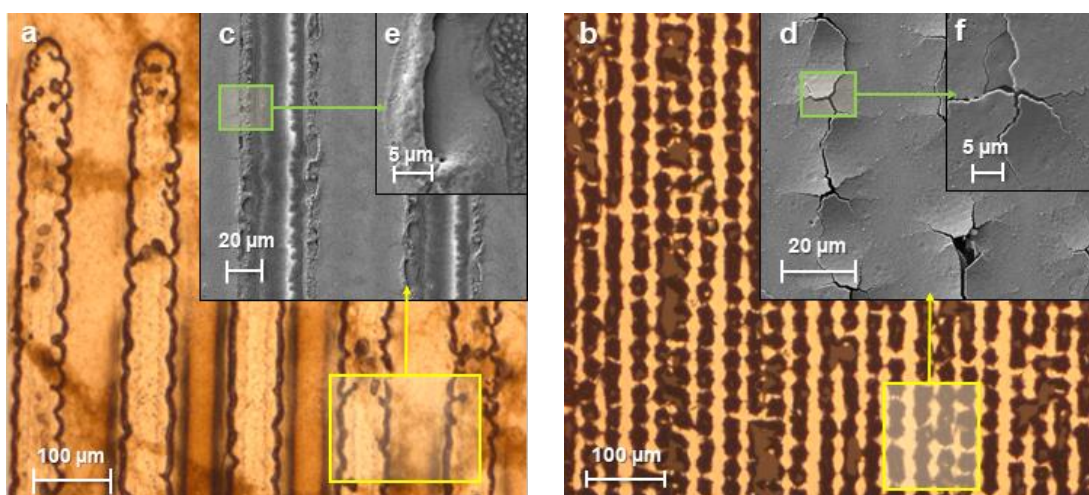
*Цитирование:* Ольхова, А. А. Модификация лазерным воздействием оптических свойств фоточувствительного детектора газоанализатора / А. А. Ольхова, А. А. Патрикеева, И. Г. Зайцев, М. М. Сергеев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 346–348.

Исследовано влияние непрерывного и импульсного лазерного излучения на оптические свойства и модификацию структуры пленок PbSe. В последние годы все чаще встает вопрос о защите окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу производств нефтегазовой, угольной и химической промышленности. Для эффективного зондирования пространства и защиты окружающей среды востребованы различные газоанализаторы и датчики, способные улавливать содержание вредных веществ в воздухе. Халькогенидные пленки являются отличными детекторами газа, поскольку они обладают высоким поглощением в ИК-диапазоне, где молекулы газа имеют пики поглощения. Существует множество способов повышения фоточувствительности таких пленок: термообработка, легирование и т. д., однако одним из доступных и низкоч затратных методов является лазерная модификация их структуры.

В работе исследован результат лазерного воздействия на пленки PbSe непрерывного излучения полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм и импульсного излучения с длиной волны 1064 нм. Лазерная обработка халькогенидных пленок в сканирующем режиме приводила к формированию трека в режиме фотопотемнения и фотопросветления (рис. 1). Спектральные отражения в этих режимах незначительно отличаются друг от друга и приближаются по своим характеристикам к абсолютно черному телу.



**Рис. 1.** Изображения пленки PbSe, модифицированной непрерывным излучением лазера с длиной волны 405 нм, полученное с помощью оптического микроскопа в светлом поле отраженного света: (а) фотопросветление, (б) фотопотемнение. Изображение пленки PbSe, полученное с помощью СЭМ-детектора вторичных электронов: (с), (d) фотопросветление, (е), (f) фотопотемнение



**Рис. 2.** Изображения пленки PbSe, модифицированной импульсным излучением лазера с длиной волны 1064 нм, полученное с помощью оптического микроскопа в светлом поле отраженного света: (а) фотопросветление, (б) фотопотемнение. Изображение пленки PbSe, полученное с помощью СЭМ-детектора вторичных электронов: (с), (d) фотопросветление, (е), (f) фотопотемнение

Было изучено влияние параметров лазерной обработки непрерывным и импульсным излучением на спектральные характеристики пленок селенида свинца. Обработка таких пленок лазерным излучением в режиме сканирования приводила к образованию трека в режиме фотопотемнения и фотопросветления. Продемонстрирована возможность управления оптическими, а также структурными характеристиками пленок селенида свинца с помощью непрерывного лазерного излучения. Лазерная обработка данного материала может использоваться в применении газового анализа, так как халькогенидные пленки

обладают высокой поглощающей способностью в среднем ИК-диапазоне (1–4 мкм), а также при создании подложек для микроаналитических исследований различных жидкостей.

### **Благодарность**

Работа выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 19-79-10208).

## **Laser estimated modification of the gas analyzer photosensitive detector optical properties**

*A. A. Olkhova, A. A. Patrikeeva, I. G. Zaitsev, M.M. Sergeev*

National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia

The result of laser action on PbSe films in the scanning mode with continuous and pulsed radiation with a wavelength of 405 nm and 1064 nm was studied. As a result of the photothermal effect on the film structure, its reflection and transmission changed in the spectral range 0.3 - 1.0  $\mu\text{m}$ . At an increased power density, photobleaching of the material and its melting were observed, followed by destruction, leading to the formation of microcracks. As the power density decreased, photodarkening of the film was observed in the region of laser action. For the modified sections of the film, in this case, a sharp decrease in transmission and reflection was observed; in terms of its optical characteristics, it approached an absolutely black body. This modification of the film is especially promising for the photodetection of organic molecules in the form of a gas mixture.

*Keywords:* Gas analysis, Chalcogenide films, Photosensitivity, Laser modification.

# Импульсная голографическая запись и диагностика объемных и тонкопленочных полупроводников методом динамических решеток

*А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич*

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В работе продемонстрированы преимущества диагностики объемных полупроводников и тонкопленочных полупроводниковых структур методом пространственно-модуляционной спектроскопии. Метод основан на анализе кинетики процессов записи и релаксации тонких и объемных, пропускающих и отражательных динамических решеток. Показана эффективность выделения электронной и тепловой компонент нелинейности, дистанционного измерения параметров тонких (субмикронных) пленок, измерения кинетических и термооптических характеристик материалов, включая времена рекомбинации свободных носителей заряда и заселения ловушечных уровней, вклад тепловой нелинейности и коэффициент температуропроводности.

*Ключевые слова:* Голография, Динамические решетки, Полупроводники, Тонкие пленки, Оптические нелинейности, Термооптика.

*Цитирование:* Толстик, А. Л. Импульсная голографическая запись и диагностика объемных и тонкопленочных полупроводников методом динамических решеток / А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 349–352.

## Введение

Среди многообразия методов исследования полупроводниковых материалов можно выделить метод динамических решеток (метод пространственно-модуляционной спектроскопии), который позволяет бесконтактно получать информацию о нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристиках вещества [1, 2]. Возможность изменения периода решетки, длины волны записывающего излучения, длительности импульсов и интенсивности лазерного излучения позволяет реализовать запись тонких и объемных, пропускающих и отражательных дифракционных решеток и выделить отдельные механизмы нелинейности. При этом появляется уникальная возможность дистанционного измерения параметров тонких (субмикронных) пленок.

В настоящей работе на примерах узко- и широкозонных полупроводников продемонстрирована эффективность выделения различных механизмов нелинейности и измерения кинетических и термооптических характеристик материалов при записи тонких и объемных динамических голограмм. Интерес к исследуемым в работе фоторефрактивным кристаллам семейства силленитов обусловлен их использованием в системах адаптивной голографической интерферометрии [3]. Перспективными для термоэлектрических приложений являются исследуемые соединения на основе халькогенидов свинца. Ведутся

разработки термоэлектриков с высокими значениями подвижности носителей заряда, термоЭДС и одновременно низкой теплопроводностью [4].

### **Используемые методы и подходы**

Для записи динамических решеток в полупроводниковых материалах использовались наносекундные лазерные импульсы, позволяющие индуцировать выброс электронов в зону проводимости. Последующая диффузия электронов, термолизация энергии возбуждения и заселение ловушечных уровней может приводить к проявлению электронной, тепловой, фоторефрактивной и других типов нелинейностей [5]. Решетки записывались на длине волны 532 нм линейно поляризованными лазерными импульсами длительностью 10 нс и зондировались излучением от непрерывного лазера на длине волны 625 нм. Были исследованы фоторефрактивные кристаллы силиката висмута (широкозонные полупроводники) и пленки теллурида свинца без примесей, а также допированные сурьмой и висмутом.

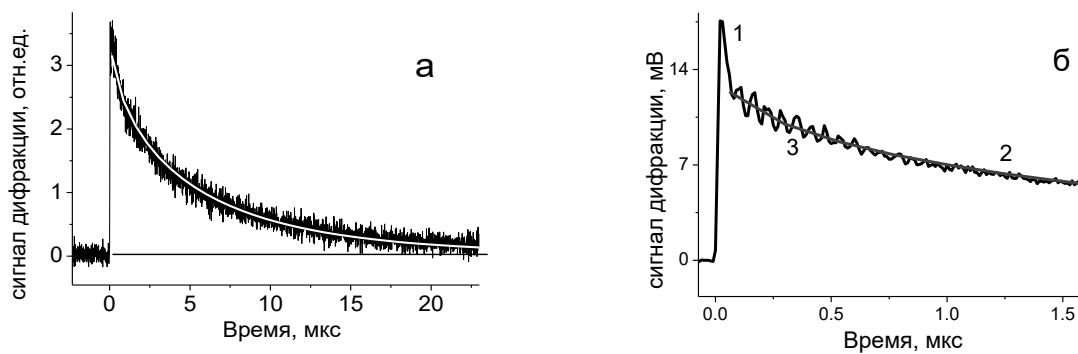
### **Результаты**

В ходе экспериментального исследования фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов определены условия записи коротко- (сотни микросекунд) и долгоживущих (секунды) голографических решеток. Измерены зависимости дифракционной эффективности от угла ориентации кристалла силиката висмута и определена четырехлепестковая угловая зависимость дифракционной эффективности (рис. 1), которая хорошо согласуется с теорией дифракции в фоторефрактивных кристаллах среза (110). Такая зависимость явно наблюдается для долгоживущих решеток, причем значения при оптимальном и неоптимальном углах отличаются более, чем в 10 раз. В то же время, короткоживущие решетки имеют гораздо менее выраженную зависимость дифракционной эффективности от угла (различия примерно в 2 раза). Установленные зависимости позволяют сделать вывод о различных механизмах формирования решеток. Долгоживущая решетка формируется за счет классического механизма фоторефрактивной нелинейности, связанным с диффузией электронов и заселением ловушечных центров. За формирование короткоживущей решетки отвечает локальный механизм перехода электронов между ловушечными уровнями и зонами.



**Рис. 1.** Зависимость дифракционной эффективности коротко- (а) и долгоживущей решетки (б) от угла ориентации кристалла

Результаты исследования пленок теллурида свинца приведены на рис. 2. Толщина поликристаллической пленки теллурида свинца с примесью сурьмы составила 1,1 мкм, период записанной решетки  $\Lambda = 25$  мкм. Температуропроводность  $\chi$  в направлении вдоль поверхности пленки вычислялась из соотношения  $\chi = \Lambda^2/4\pi^2\tau$  по измеренным периоду решетки  $\Lambda$  и времени ее жизни  $\tau$ . На рис. 2а представлена полная кинетика дифракции, на рис. 2б – начальный ее фрагмент. Цифрами обозначены три характерных участка сигнала: зарождение и распад решетки свободных носителей заряда (1), релаксация тепловой решетки (2) и следствие возбуждения акустической монохроматы в воздухе (3).



**Рис. 2.** Кинетики дифрагированного сигнала, демонстрирующие возбуждение и распад тепловой решетки в поликристаллической пленке РbТе с примесью сурьмы. Белой кривой обозначен результат сопоставления эксперимента с теорией

Осцилляции на рис. 1б происходят вследствие термического возбуждения акустической волны в тонком слое воздуха, контактирующем с поверхностью пленки. На рис. 1б в начале кинетики виден также короткий пик дифракции, который связан с формированием решетки свободных носителей заряда.

### Заключение

Предложенный метод бесконтактной диагностики тонких пленок позволяет выделять различные механизмы нелинейности и получать уникальную информацию об субмикронных



объектах, включая кинетику отклика и температуропроводность. Установленные закономерности угловых зависимостей дифракционной эффективности для коротко- и долгоживущих голографических решеток представляют практический интерес для оптимизации условий записи голографических решеток в системах адаптивной интерферометрии, для которой существенны времена жизни решеток. Переход к короткоживущим решеткам расширяет область использования адаптивных интерферометров, позволяя фиксировать сигналы во всем звуковом диапазоне.

### Список источников

- [1] **Ивакин, Е. В.** Лазерный дифракционный релаксометр для исследования кинетики фотовозбуждения в конденсированных средах / Е. В. Ивакин // Оптический журнал. — 2000. — Том 67. — № 11. — С. 27–30.
- [2] **Dadenkov, I. G.** Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals / I. G. Dadenkov, A. L. Tolstik, Yu. I. Miksyuk, K. A. Saechnikov // Optics and Spectroscopy. — 2020. — Vol. 128. — P. 1401–1406.
- [3] **Ромашко, Р. В.** Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения / Р. В. Ромашко // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. — 2021. — № 4. — С. 40–47.
- [4] **Chen, Z.** Lattice dislocations enhancing thermoelectric PbTe in addition to band convergence / Z. Chen, Z. Jian, W. Li, Y. Chang, B. Ge, R. Hanus, J. Yang, Y. Chen, M. Huang, G. J. Snyder, Y. Pei // Advanced Materials. — 2017. — Vol. 29. — P. 1606768.
- [5] **Толстик, А. Л.** Пространственно-модуляционная спектроскопия полупроводниковых материалов на основе динамических решеток / А. Л. Толстик, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 5. — С. 3–10.

## Pulsed holographic recording and diagnosis of bulk and thin-film semiconductors by transient grating method

*A. L. Tolstik, E. V. Ivakin, I. G. Dadenkov, A. A. Stankevich*

Belarusian State University, Minsk, Belarus

This work demonstrates the advantages of diagnostics of bulk semiconductors and thin-film semiconductor structures by spatial-modulation spectroscopy. The method is based on the analysis of the kinetics of recording and relaxation processes of thin and volume, transmission and reflection transient gratings. The efficiency of separation of electronic and thermal nonlinearity components, distance measurements of thin (submicron) films parameters, measurements of kinetic and thermo-optical characteristics of materials, including recombination times of free charge carriers and trap levels occupancy, thermal nonlinearity contribution and thermal diffusivity coefficient are shown.

*Keywords:* Holography, Transient gratings, Semiconductors, Thin films, Optical nonlinearities, Thermo-optics.

# Усиление нелинейностей при коллинеарном взаимодействии света с бегущей решеткой показателя преломления

*В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Продемонстрированное на прошлой конференции эффективное коллинеарное взаимодействие оптической и СВЧ волн было возможно наблюдать только на коротком отрезке. Это было обусловлено целым рядом причин, доложенных тогда же. В данной работе для решения этой проблемы было предложено увеличить эффективную область взаимодействия за счет добавления к системе волоконной петли обратной связи. Так как для максимально эффективного взаимодействия необходимо, чтобы при каждом проходе через устройство для коллинеарного взаимодействия оптическая и электрическая волны взаимодействовали без фазовых разрывов, мы добавили к устройству емкостный электрод, чтобы получить возможность настройки оптической длины кольца обратной связи.

*Ключевые слова:* Бегущие решётки показателя преломления, СВЧ фазовая модуляция света, Дифракционные оптические элементы.

*Цитирование:* **Герасименко, В. С.** Усиление нелинейностей при коллинеарном взаимодействии света с бегущей решеткой показателя преломления / ВВ. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 353–356.

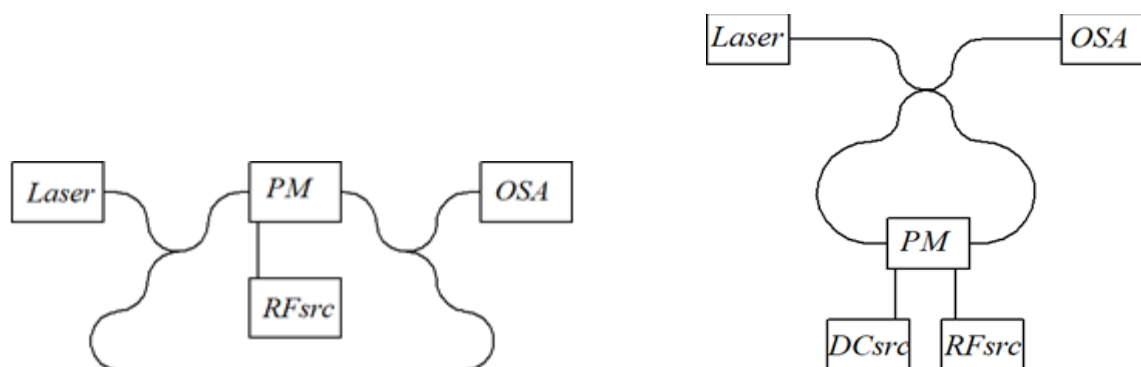
Амплитудно-фазовое управление когерентным светом позволяет создавать фазовые и амплитудные модуляторы с большой полосой пропускания. Такие модуляторы необходимы для многих систем классической и квантовой связи.

Одна из возможных реализаций – использование связки волноводов и электродов бегущей волны [1]. Подложка обычно изготавливается из материала, обладающего электрооптическим эффектом, например, ниобата лития [2]. Прикладывание электрического поля к электродам создает между ними бегущую волну электрического поля, что приводит к модуляции фазы оптической волны. Для управления амплитудой волновода должны располагаться по принципу интерферометра Маха-Цендера. Для более эффективного коллинеарного взаимодействия на высоких частотах необходимо использовать электроды бегущей волны с показателем преломления, близким к показателю преломления оптического волновода.

Мы провели серию экспериментов с модуляторами собственного производства, целью которых было усилить нелинейности добавлением обратной связи. В них использовался лазер с длиной волны 1550 нм, шириной спектральной линии менее 1 МГц и выходной мощностью до 2 мВт, оптический анализатор спектра и волоконно-оптические разветвители и объединители (рис. 1а).

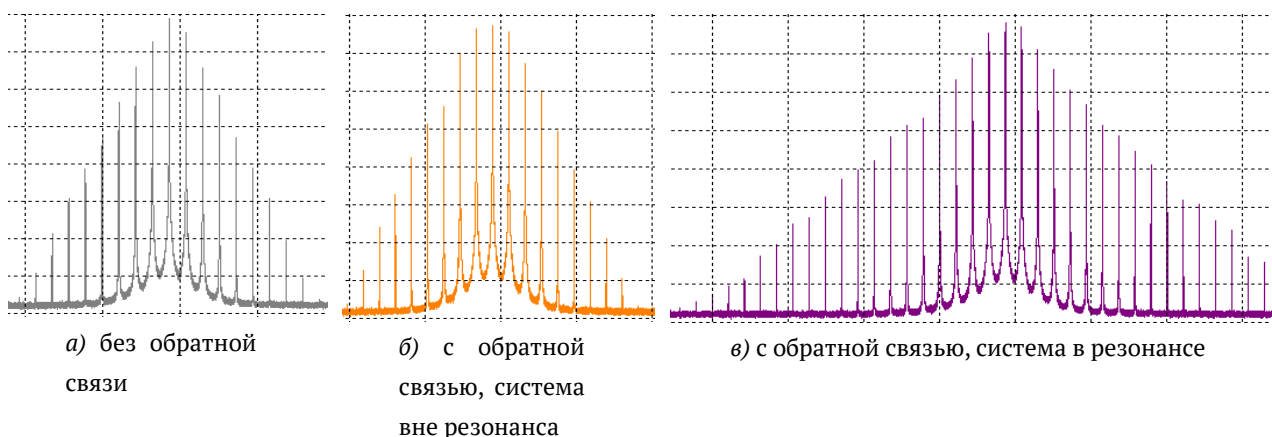
Общая длина петли обратной связи составила около 6 метров. Эксперименты проводились с разветвителем 10/90. Возвратная мощность 90% продемонстрировала сильные резонансные эффекты в системе (рис. 2). В то же время использование стандартного фазового

модулятора показало, что выходной спектр достаточно нестабилен. Представленные здесь графики – результат усреднения по приблизительно 20 отсчетам.



Laser – лазерный источник, source, PM – электро-оптический фазовый модулятор, OSA – спектроанализатор, RFsrc – модулируемый СВЧ-источник, DCsrc – источник постоянного тока  
 а) схема первой экспериментальной установки:      б) схема второй экспериментальной установки:

**Рис. 1.** Схемы экспериментальных установок



**Рис. 2.** Выходной спектр

Ключевыми отличиями амплитудного и фазового электрооптических модуляторов являются топология оптических волноводов (интерферометр Маха-Цендера и линия соответственно) и наличие в амплитудном модуляторе дополнительного емкостного электрода (для регулировки длин плеч интерферометра). Это позволило сделать фазовый модулятор с возможностью тонкой подстройки эффективной длины петли обратной связи. Помимо замены штатного фазового модулятора на специализированный в схеме новых опытов (рис. 1б) мы заменили систему разветвитель-объединитель на одинарный разветвитель с коэффициентом деления 1/99. В результате пик лазерного излучения (нулевая гармоника) в выходном спектре выше первого порядка примерно на 40 дБ. Пики более высоких порядков (рис. 3) стали не так хорошо различимы спектроанализатором, как в первой серии экспериментов. Эти графики приведены без усреднения.

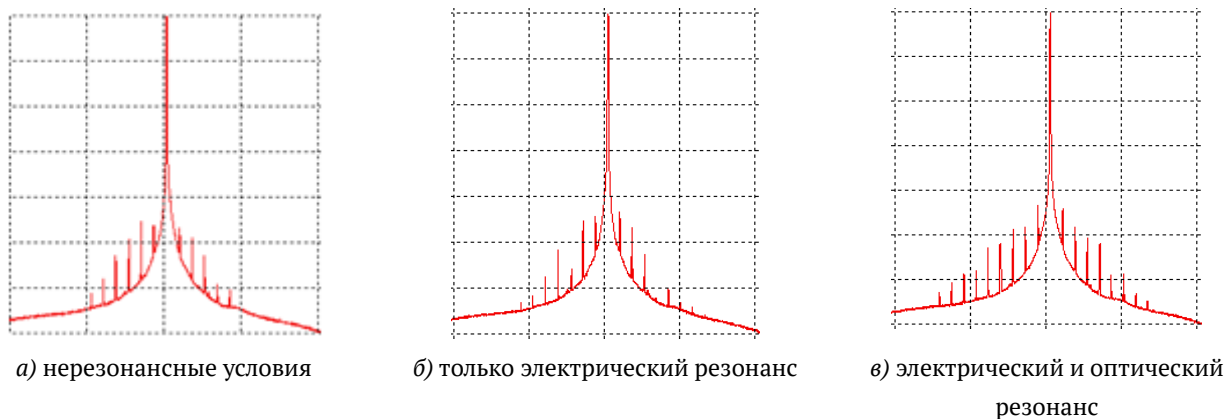


Рис. 3. Примеры выходных спектров

Несмотря на особенности работы спектроанализатора, эксперимент показал ожидаемые результаты. После волоконного кольца получался выходной спектр определенной ширины, который менялся при каждом измерении из-за отсутствия обоих резонансов. При достижении электрического резонанса порядок высшей генерируемой гармоники увеличивался, однако без усреднения можно было наблюдать, как растут и уменьшаются те или иные пики при каждом новом измерении. Наконец, при попадании в окрестность оптического резонанса еще имело место небольшое уширение спектра, но главное, что сам спектр приобретал относительно устойчивую форму. Нестабильность условия оптического резонанса является результатом тепловых эффектов, однако эти эффекты достаточно медленные, поэтому несколько последовательных измерений мало отличаются друг от друга.

#### Список источников

- [1] **Wooten E.L.** A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communication systems / E.L. Wooten, K. M. Kissa, et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. — 2000. — Vol 6. — № 1. — P. 69–82.
- [2] **Yariv A.** Introduction to Optical Electronics; 2nd ed., — New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976. — pp. 438.

## Amplification of nonlinearities in the collinear interaction of light with a traveling refractive index grating

*V. S. Gerasimenko, N. D. Gerasimenko*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The effective collinear interaction of optical and microwave waves demonstrated at the last conference could only be observed over a short length. This was due to a number of reasons reported at the same time. In this work, to solve this problem, it was proposed to increase the effective interaction area by adding a fiber feedback loop to the system. Since for the most effective interaction it is necessary that at each pass through the collinear interaction device, the optical and

electric waves interact without phase discontinuities, we added a capacitive electrode to the system in order to be able to adjust the optical length of the feedback loop.

*Keywords:* Refractive index moving gratings, Microwave phase modulation of light, Diffractive optical elements.

# Моды утечки и нелинейности в бегущих электро-оптических решетках

*В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

При исследовании коллинеарного взаимодействия оптического излучения с бегущей решеткой показателя преломления для интерферометра Маха-Цендера было обнаружено, что при определенных условиях можно использовать перекачку энергии практически только в четные или нечетные порядки. При этом порядки второго типа в спектре присутствуют, но их амплитуда крайне мала. Объяснением этому являются моды утечки. Моделирование показало, что мощность мод утечки на выходе интерферометра Маха-Цендера может достигать до 14% от входной мощности в условиях минимальных потерь даже при отсутствии бегущей фазовой решетки. А взаимодействие этих мод с бегущей решеткой показателя преломления приводит к увеличению мощности мод утечки и значительному возрастанию оптического шума.

**Ключевые слова:** Бегущие решетки показателя преломления, СВЧ фазовая модуляция света, Дифракционные оптические элементы.

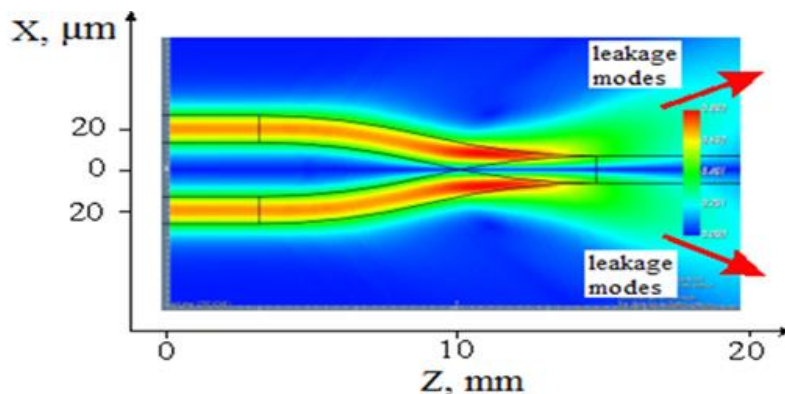
*Цитирование:* Герасименко, В. С. Моды утечки и нелинейности в бегущих электро-оптических решетках / В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 357–359.

Электрооптические модуляторы из ниобата лития являются важными элементами как классических, так и квантовых систем связи [1, 2]. В этом случае верхняя граница динамического диапазона модулятора ограничена нелинейными искажениями, а нижняя — шумами. В то время как тепловые шумы сопротивления нагрузки электродов бегущей волны незначительны, оптические перекрестные помехи между волноводными модами и модами утечки могут быть ограничивающим фактором.

Типичный фазовый модулятор (ФМ) ниобата лития состоит из линейного волновода, над которым располагаются электроды бегущей волны. Так как геометрия проста, единственный источник мод утечки – дефекты обработки и изготовления (включая неправильное соединение волновода и оптических волокон). В амплитудном модуляторе (АМ) на ниобате лития также происходит фазовая модуляция в линейных частях интерферометра Маха-Цендера. Эта геометрия содержит s-образные изгибы, которые сами по себе являются источником утечки оптической мощности. Современный качественный ФМ имеет потери около 2,0 дБ, а потери АМ около 4 дБ.

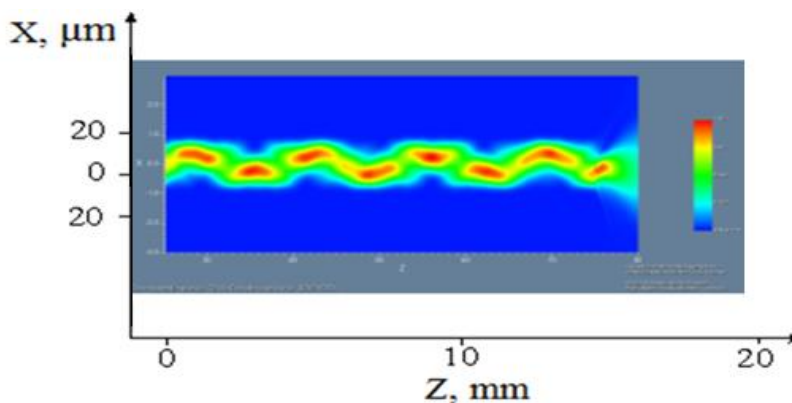
Мы выполнили ряд симуляций как для фазового, так и для амплитудного модулятора. Потери ФМ, как и ожидалось, были вызваны только изменением профиля показателя преломления, однако в АМ на универсальном Y-объединителе возбуждаются дополнительные моды утечки. Дальнейшее моделирование проводилось только для АМ, как представляющего наибольший интерес.

На рис. 1 представлено моделирование Y-объединителя. Видно, что в этом случае мощность, распространяющаяся по плечам интерферометра, не попадает в выходной волновод, а полностью уходит в подложку по двум симметричным модам утечки, а затем падает на тыльную сторону подложки.



**Рис. 1.** Численное моделирование мод утечки на выходе амплитудного модулятора

Моды утечки создают в подложке неконтролируемый оптический шум, и часть этого излучения может снова попасть в волноводы. Это может привести к уменьшению динамического диапазона модулятора. На рис. 2 приведен пример моделирования процесса распространения обратно отраженной мощности от задней поверхности подложки.



**Рис. 2.** Численное моделирование распределения мощности излучения, отраженного от задней грани и проникшего в подложку по модам утечки. Отраженная мощность распространяется справа налево

Другой важной проблемой является возможность атаки на квантовую линию связи, в которой используются как фазовые, так и амплитудные модуляторы. Оптическая мощность, рассеиваемая через моды утечки, синхронизирована с амплитудной модуляцией, используемыми в канале. Можно предположить, что часть рассеиваемой мощности может быть обнаружена злоумышленником в квантовой линии связи на заметном расстоянии от модулятора.

## Список источников

- [1] **Петров В. М.** Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций / Петров В. М., Шамрай А. В., Ильичёв И. В., П. Агрузов П. М., Лебедев В. В., Герасименко Н. Д., Герасименко В. С. // Фотоника. — 2020. — Том 14. — №5. — С. 414–422.
- [2] **Шамрай А. В.** Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития. / Шамрай А. В., Петров В. М., Агрузов П. М., Лебедев В. В., Ильичёв И. В. // Успехи Физических Наук. — 2021. — Том 191. — №7. — С.760–782.

## Leakage modes and nonlinearities in traveling electro-optical gratings

*V. S. Gerasimenko, N. D. Gerasimenko*

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

When we researched the collinear interaction of optical observation with a traveling refractive index grating for a Mach-Zehnder interferometer (MZI), it was found that under certain conditions it is possible to use energy transfers practically only in even or odd orders. In this case, orders of the second type are present in the spectrum, but their amplitude is extremely small. The explanation for this is the leakage modes. The simulation showed that the power of the leakage modes at the output of the MZI can reach up to 14% of the input power under conditions of minimal losses, even in the absence of a traveling phase grating. And the interaction of these modes with the refractive index traveling grating leads to an increase in the power of leakage modes and a significant increase in optical noise.

*Keywords:* Refractive index moving gratings, Microwave phase modulation of light, Diffractive optical elements.



# Исследование динамики пылеобразования в быстропротекающих процессах на основе малоуглового рассеяния света

*Ш. М. Исмаилов, В. Г. Каменев*

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,  
Москва, Россия

В докладе описаны лазерно-оптические методы, на основе которых разрабатывается аппаратура для регистрации параметров прошедшего и рассеянного дисперсной средой излучения. Результаты применения методов и созданной аппаратуры позволяют получить информацию о концентрации рассеивателей и их размерах при различной интенсивности процессов пыления в газодинамических экспериментах.

*Ключевые слова:* Оптика, Голография, Рассеяние света, Динамика, Рассеяние Ми, КОР.

*Цитирование:* **Исмаилов, Ш. М.** Исследование динамики пылеобразования в быстропротекающих процессах на основе малоуглового рассеяния света / Ш. М. Исмаилов, В. Г. Каменев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 360–364.

Изучение свойств конструкционных материалов и специальных изделий очень актуальная задача в области газодинамических исследований ударно-волновыми методами. При этом для регистрации движения поверхностей в основном используются различные методы [1]. Однако при взаимодействии ударной волны с поверхностью образца и превышении пороговых значений давления наблюдаются процессы откола и микрокумуляции частиц пыли, приводящие к образованию металлических частиц. В начале движения поверхности образовавшиеся частицы обладают скоростями, превышающими скорость самой поверхности, в результате чего поверхность экранируется облаком данных частиц [2]. Параметры дисперсной фазы существенно влияют на результаты исследования движения свободной поверхности оптическими и интерферометрическими методами, так как частицы дисперсной фазы создает паразитный сигнал излучения и экранирует свободную поверхность от зондирующего излучения. В настоящее время механизмы образования дисперсной фазы при ударно-волновом нагружении конструкционных материалов изучены в недостаточной мере, что делает востребованными результаты настоящего исследования. Определение параметров облака дисперсной фазы возможно с помощью таких оптических методов как статистическое рассеяние, фотонная корреляционная спектроскопия, дифракционные методы, электронная микроскопия [3]. В настоящей работе описаны результаты исследования возможности использования метода малоуглового рассеяния света на частицах малого размера в соответствии с теорией Ми.

Совокупность голографии, методов КОР и рассеяния Ми позволит расширить диапазон регистрации параметров пылевых образований. Одновременная регистрация несколькими методами позволит отследить динамику развития пылевого облака, рисунок 1.

В начальный момент выхода ударной волны на поверхность образца, с поверхности вылетают сначала частицы малого размера и в небольшой концентрации, что позволяет исследовать динамику пыления с помощью послойного голографирования процесса. Затем начинает образовываться более плотное облако пыли с размерами большими или равными с длиной волны излучения, которое будет исследоваться в данном докладе с помощью методов рассеяния Ми и Релея. На третьем этапе начинают образовываться струи вперемешку с крупными частицами и плотной пылью, такое распределение частиц хорошо регистрирует метод когерентного обратного рассеяния.

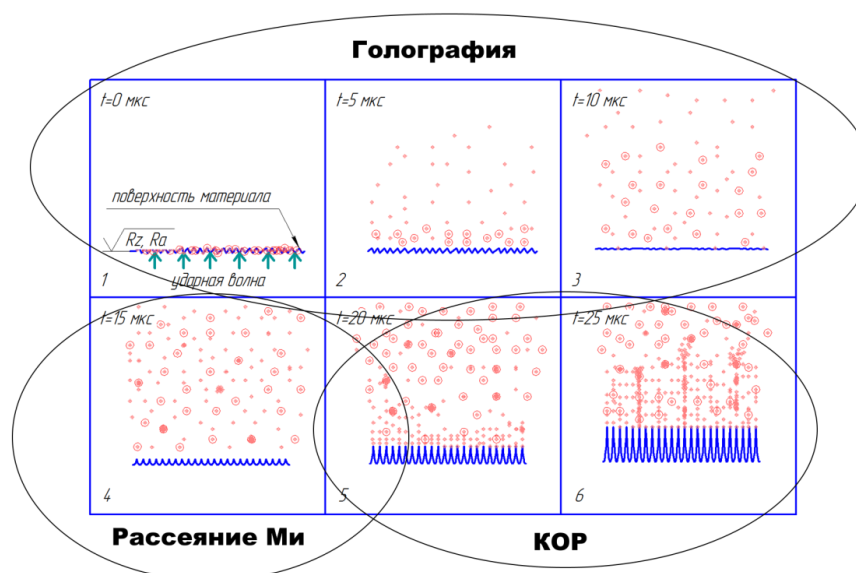


Рис. 1. Исследование комбинированных методов

На рисунке 2 представлена демонстрация эффекта рассеяния монохроматического излучения, где а – прохождение света через чистую прозрачную среду, б – прохождение света через дисперсную фазу, во втором случае на экране более размытое пятно, что связано с рассеянием на частицах дисперсной фазы.

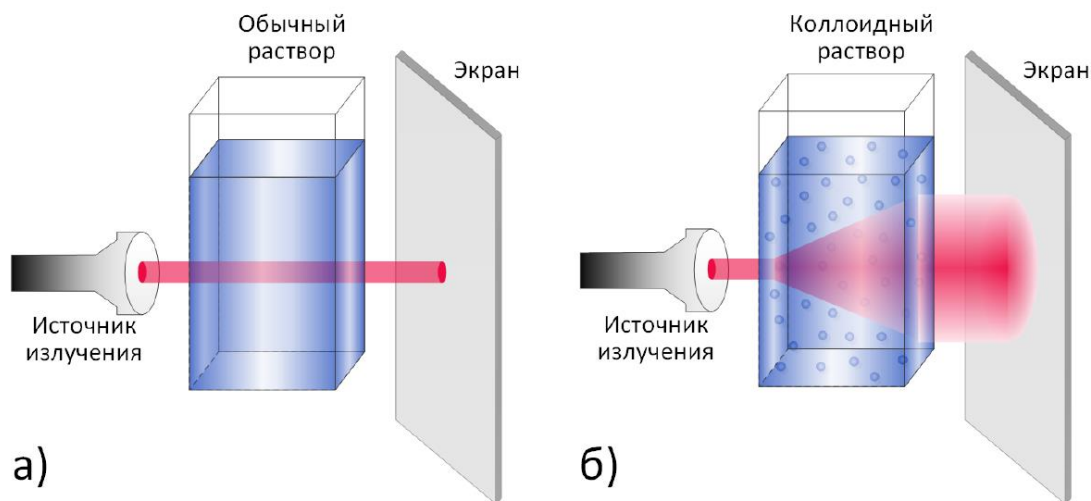


Рис. 2. Демонстрация эффекта рассеяния: а) отсутствие эффекта рассеяния в обычном растворе; б) наблюдение эффекта рассеяния в дисперсной фазе

Из теории Ми следует, что угловое распределение света, рассеянного частицами дисперсной среды, однозначно связано с радиусом частицы  $R$  [4]. Интенсивность света, рассеянного одной частицей под разными углами к направлению падающего луча (индикатриса рассеяния света), определяется следующим соотношением:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4}{z^2 \lambda^2} R^6 \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) (1 + \cos^2 \gamma),$$

где  $m$  – показатель преломления вещества частицы,  $z$  – расстояние от частицы до регистрирующего прибора,  $\lambda$  – длина волны,  $I_0$  и  $I$  – интенсивности падающего и рассеянного излучателей,  $\gamma$  – угол под которым измеряется интенсивность рассеянного излучения относительно падающего.

Укрупнение частиц приводит к изменению индикатрисы рассеяния:

1. при размерах частиц  $0,1\lambda - 1,0\lambda$  преобладает рассеяние вперёд по направлению распространения первичного излучения;
2. при размерах частиц, превышающих  $1,0\lambda$ , под различным углами распространения появляются дополнительные «лепестки» максимумов интенсивности (рисунок 3) [5-6].

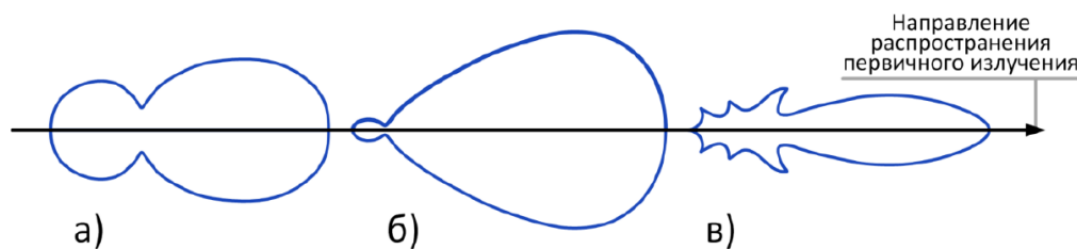
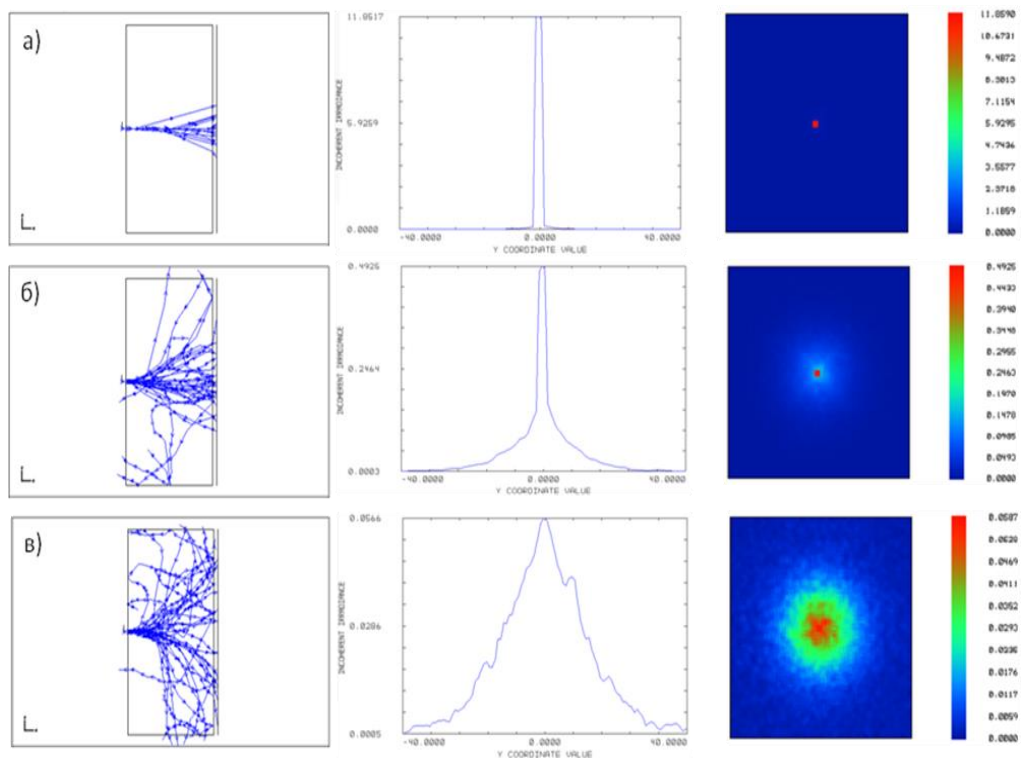


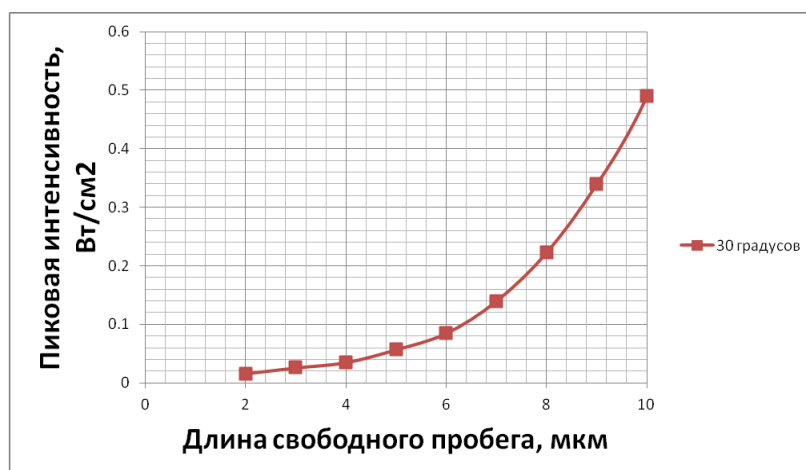
Рис. 3. Индикатрисы рассеяния для частиц, размеры которых равны: а)  $1/3 \lambda$  б)  $1,0\lambda$ ; в) более  $1,0\lambda$

В среде Zemax было проведено расчетное моделирование переноса фотона через среду при заданном угле  $30^{\circ}$  и различных длин свободного пробега, рисунок 4.



**Рис. 4.** Расчет рассеяния при заданном угле  $30^{\circ}$  и длине свободного пробега:  
 а) 100 мкм; б) 10 мкм; в) 5 мкм

На рисунке 5 приведена зависимость пиковой интенсивности рассеянного излучения от длины свободного пробега фотона в дисперсной среде.



**Рис. 5.** Зависимость пиковой интенсивности рассеянного излучения от длины свободного пробега фотона в дисперсной среде

## Выводы

Разработан стенд для регистрации и анализа рассеянного излучения в соответствии с теорией Ми и Релея. Выполнено экспериментальное и расчетное исследование рассеяния света на частицах дисперсной фазы. На основании результатов, полученных из экспериментальных данных и проведенных расчетов, метод рассеяния Ми позволяет получить информацию о концентрации частиц, а по диаграмме рассеяния Ми возможно оценить размеры частиц.

## Список источников

- [1] Кузьмин В. Л., Романов В. П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – №. 3. – С. 247–278.
- [2] Schauer M. M. et al. Ejected particle size distributions from shocked metal surfaces // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2017. – Т. 3. – №. 2. – С. 217–224.
- [3] Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н. Проблемы определения размеров наночастиц // Сибирский журнал науки и технологий. – 2011. – №. 2 (35). – С. 167–170.
- [4] Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред – Минск: Наука и техника, 1969. – 592 с.
- [5] Зверева, С. В. В мире солнечного света / С. В. Зверева; рец. К. С. Шифрин // Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 160 с.
- [6] Матвеев, А. Н. Оптика: Учеб. пособие для физ. спец. Вузов // М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.

## Investigation of the dynamics of dust formation in fast-flowing processes based on small-angle light scattering

*Sh. M. Ismailov, V. G. Kamenev*

The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

The report presents a description of laser-optical methods and equipment for recording the parameters of laser radiation transmitted and scattered by a dispersed medium. The results of the application of the methods and the created equipment make it possible to obtain information on the concentration of scatterers and their sizes at various intensities of dusting processes in gas dynamic experiments.

*Keywords:* Optics, Holography, Light scattering, Dynamics, Mie scattering, CBS.

# Металинзы для острой фокусировки света и формирования обратных потоков энергии

С. С. Стафеев<sup>1</sup>, А. Г. Налимов<sup>1</sup>, Л. О'Фаолейн<sup>2</sup>, В. В. Котляр<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> Технологический институт Корка, Корк, Ирландия

В данной работе численно и экспериментально рассмотрены металинзы основанные на секторных субволновых решетках и предназначенные для конверсии поляризации света и острой фокусировки получившегося пучка. Показана возможность получения субволновых фокусных пятен с их помощью.

*Ключевые слова:* Металинза, Субволновая решетка, Острая фокусировка, СБОМ.

*Цитирование:* Стафеев, С. С. Металинзы для острой фокусировки света и формирования обратных потоков энергии / С. С. Стафеев, А. Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, В. В. Котляр // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 365–367.

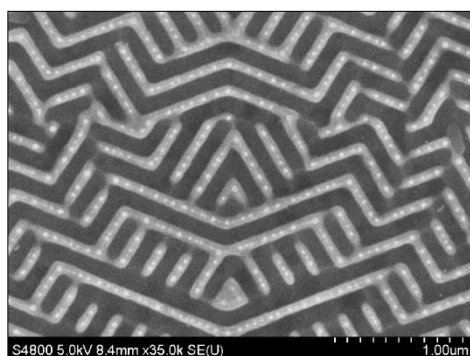
## Введение

Дифракционные оптические элементы, предназначенные для изменения состояния амплитуды и фазы света известны в оптике давно, но лишь относительно недавно внимание исследователей сосредоточилось на элементах, преобразующих и поляризацию света. Для этого используются дифракционные решётки с разным наклоном штрихов и с периодом меньше длины волны — субволновые решетки [1]. Показатели преломления света, проходящего через такую решётку различны для ТЕ и ТМ поляризованной волны [2,3], а следовательно, возможно создание аналогов классических волновых пластинок. Для управления поляризацией падающего света нужно рассчитать период, скважность, глубину рельефа и направление штрихов решётки в каждой точке поверхности. Для этого надо использовать строгое решение векторных уравнений Максвелла. Впервые поворот поляризации света с помощью субволновой решётки — аналога четвертьволновой пластинки, был экспериментально продемонстрирован в работах [4,5], где осуществлялось преобразование света круговой поляризации с длиной волны 10,6 мкм в азимутально-поляризованный пучок. Реализация полуволновой пластинки требует большего аспектного отношения отдельных элементов решётки, поэтому изготовить её сложнее. Высота рельефа такой решётки должна быть в два раза выше, чем у четвертьволновой пластинки. В [6] впервые была экспериментально продемонстрирована работа субволновой решётки — аналога полуволновой пластинки.

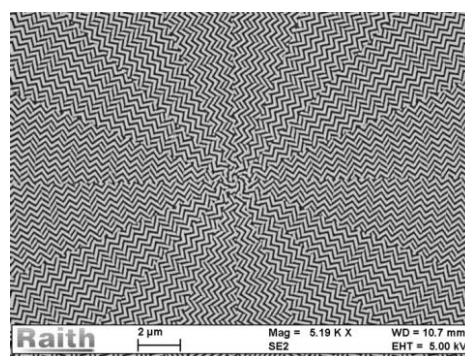
В данной работе были изготовлены, численно и экспериментально исследованы металинзы на основе субволновых решеток, предназначенные для преобразования поляризации и острой фокусировки лазерного излучения.

## Металинзы для острой фокусировки лазерного излучения

Металинзы на рис. 1 были изготовлены по технологии электронной литографии. На поверхность аморфного кремния (130 нм) (a-Si) на прозрачной пирексной подложке, нанесли 320 нм резиста (ПММА), который закрепили при температуре 180 °С. Величина толщины резиста (320 нм) была подобрана оптимальным образом. Во избежание формирования заряда на поверхности образца, на него было распылено 15 нм золота. Электронным лучом с напряжением 30 кВ была написана картина 4 секторной решётки-поляризатора на поверхности резиста. Для проявления образца, использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом процессе слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА. Трансформирование шаблона решётки-поляризатора с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов  $\text{CHF}_3$  и  $\text{SF}_6$ . Толщина резистора была подобрана таким образом, чтобы он смог защитить части картины во время травления 130 нм аморфного кремния. Аспектное отношение скоростей травления материала и маски было найдено 1:2,5.



а) Металинза для острой фокусировки лазерного излучения



б) Металинза для получения обратного потока световой энергии

**Рис. 1.** Изображения изготовленных металинз, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа

Металинза на рис. 1а предназначалась для преобразования линейно-поляризованного света в радиально-поляризованный пучок и его острой фокусировки. Экспериментально измеренные значения ширины пятна были равны  $\text{FWHM}_x = 0,55\lambda$ ,  $\text{FWHM}_y = 0,49\lambda$ . Эти значения отличаются всего на 8% от расчётных значений ( $\text{FWHM}_x = 0,521\lambda$ ,  $\text{FWHM}_y = 0,457\lambda$ ), полученных с учетом технологических погрешностей изготовления металинзы, и на 15% от размеров фокусного пятна для идеальной металинзы ( $\text{FWHM}_x = 0,434\lambda$ ,  $\text{FWHM}_y = 0,432\lambda$ ), у которой нет разбросов высоты рельефа и высота рельефа равна 70 нм [7].

Металинза на рис. 1б предназначалась для получения в фокусе областей, в которых направление потока энергии было противоположно направлению распространения пучка (областей обратного потока энергии [8]). Моделирование методом FDTD, реализованным в программе FullWave показало, что металинза (рис. 1б) формирует обратный поток при освещении её светом любой поляризации: линейной, круговой правой и круговой левой [9].

## Заключение

В данной работе были изготовлены, численно и экспериментально исследованы металинзы на основе субволновых решеток, предназначенные для преобразования поляризации и острой фокусировки лазерного излучения.

## Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595).

## Список источников

- [1] **Стафеев, С.С.** Бинарные дифракционные решётки для управления поляризацией и фокусировкой лазерного света / С. С. Стафеев, А. Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, М. В. Котляр // Компьютерная оптика. — 2017. — Том. 41. — С. 299–314.
- [2] **Lalanne, P.** On the effective medium theory of subwavelength periodic structures / P. Lalanne, D. Lemercier-Lalanne // J. Mod. Opt. — 1996. — Vol. 43. — P. 2063–2086.
- [3] **Kotlyar, V. V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V. V. Kotlyar, O. K. Zalyalov // Optik. — 1996. — Vol. 103. — P. 125–130.
- [4] **Bomzon, Z.** Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman, // Opt. Lett. — 2001. — Vol. 26. — P. 1424–1426.
- [5] **Bomzon, Z.** Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // Opt. Lett. — 2002. — Vol. 27. — P. 285–287.
- [6] **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // Opt. Lett. — 2004. — Vol. 29. — P. 1718–1720.
- [7] **Котляр, В. В.** Тонкая металинза с высокой числовой апертурой / В. В. Котляр, А. Г. Налимов, С. С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М. В. Котляр // Компьютерная оптика. — 2017. — Том. 41. — С. 5–12.
- [8] **Kotlyar, V. V.** Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity / V. V. Kotlyar, S. S. Stafeev, A. G. Nalimov // Phys. Rev. A. — 2019. — Vol. 99. — P. 033840.
- [9] **Котляр, В. В.** Высокоапертурная металинза для формирования обратного потока энергии / В. В. Котляр, С. С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М. В. Котляр // Компьютерная оптика. — 2020. — Том. 44. — С. 691–698.

## Metalenses for tight focusing and reverse energy flow

*S. S. Stafeev<sup>1</sup>, A. G. Nalimov<sup>1</sup>, L. O'Faolain<sup>2</sup>, V. V. Kotlyar<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

<sup>2</sup> Cork Institute of Technology, Cork, Ireland

In this work we have investigated numerically and experimentally metalenses based on sectoral subwavelength gratings and designed for polarization conversion and tight focusing of the incident beam. It was demonstrated the possibility of obtaining subwavelength focal spots using these metalenses.

*Keywords:* Metalens, Subwavelength, Grating, Tight focusing, SNOM.



# Резонансы в дифракционных решётках с изменяющимся периодом

Д. А. Быков<sup>1,2</sup>, А. А. Морозов<sup>1</sup>, Е. А. Безус<sup>1,2</sup>, В. В. Подлипов<sup>1,2</sup>, Л. Л. Досколович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Резонансные дифракционные структуры с параметрами, изменяющимися вдоль пространственной координаты, широко используются в качестве фильтрующих элементов оптических сенсоров. В настоящей работе исследуются оптические свойства волноводной резонансной дифракционной решётки, период которой линейно изменяется в направлении периодичности. Такая структура позволяет осуществлять спектральную фильтрацию, причём спектральное положение резонансного максимума отражения изменяется вдоль структуры. На основе строгого численного моделирования исследовано влияние скорости изменения периода на ширину резонансного пика в спектре отражения. Разработана пространственно-временная теория связанных мод, описывающая оптические свойства рассматриваемой структуры. Предсказания, полученные в рамках данного подхода, согласуются с результатами численного моделирования и результатами проведённого эксперимента.

*Ключевые слова:* Оптический фильтр, Дифракционная решётка, Резонанс, Мода.

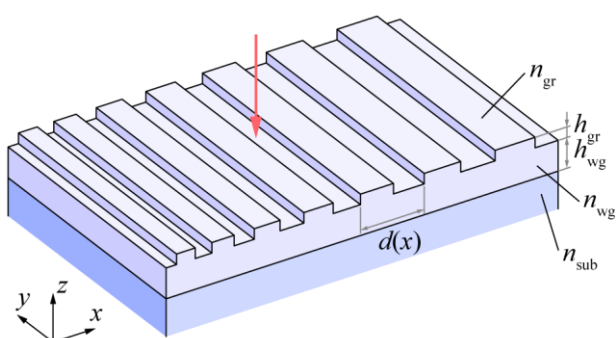
*Цитирование:* Быков, Д. А. Резонансы в дифракционных решётках с изменяющимся периодом / Д. А. Быков, А. А. Морозов, Е. А. Безус, В. В. Подлипов, Л. Л. Досколович // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 368–372.

В последнее время большое внимание уделяется изучению резонансных эффектов в структурах нанофотоники. Резонансные структуры имеют множество применений, в том числе в качестве оптических фильтров, датчиков, лазерных резонаторов, нелинейных оптических устройств и др. [1]. Одно из важных приложений резонансные оптические структуры находят в гиперспектральных оптических системах.

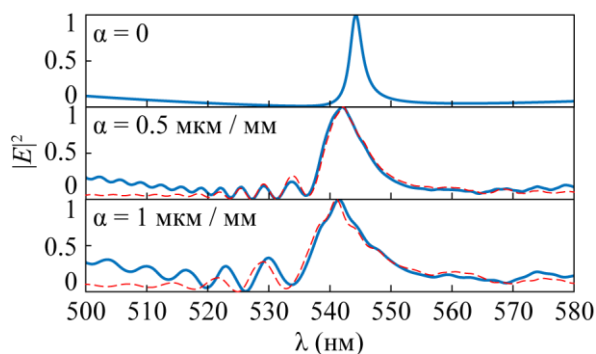
В гиперспектральных приложениях оптические фильтры часто реализуются в виде “дискретного” набора резонансных структур (конечных “сегментов” дифракционных решеток или систем однородных слоев), каждый из которых имеет фиксированную резонансную частоту. Изменение спектрального положения резонансного пика также может быть достигнуто посредством непрерывного изменения одного из параметров резонансной структуры [2–7]. В частности, в так называемых линейно изменяющихся фильтрах изменение положения резонанса обеспечивается изменением толщины резонатора Фабри-Перо, расположенного между двумя брэгговскими зеркалами. Спектрометры, основанные на таком подходе, достаточно компактны, поскольку такой оптический фильтр может располагаться непосредственно на поверхности ПЗС-матрицы. Еще одно преимущество структур с линейно изменяющимися параметрами — относительная простота их изготовления [2–7]. Следует

отметить, что большинство существующих работ, посвященных линейно изменяющимся фильтрам, являются экспериментальными [2–9], в то время как вопросы численного моделирования и аналитического описания свойств этих структур в известных работах не рассматриваются.

В настоящей работе мы рассматриваем оптические свойства волноводной резонансной решетки с плавно изменяющимся периодом (см. рис. 1а). Исследование основано на строгом решении задачи дифракции методом Фурье-мод, а также на основе теории связанных мод и в рамках эксперимента.



а) Геометрия резонансной дифракционной решётки с изменяющимся периодом



б) Интенсивность отражённого поля над структурой при  $x = 0$  при разных значениях длины волны  $\lambda$  и скорости изменения периода  $\alpha$ .

Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры (а) и спектры её отражения при  $x = 0$  (б)

Геометрия рассматриваемой структуры показана на рис. 1а. Структура состоит из волноводного слоя, расположенного между подложкой и дифракционной решеткой с периодом, линейно меняющимся в направлении периодичности по следующему закону:

$$d(x) = d_0 + \alpha x, \quad (1)$$

где  $\alpha$  определяет скорость изменения периода. В данной работе рассматривается структура со следующими параметрами: средний период  $d_0 = 195$  нм; скважность решетки (отношение ширины ступеньки к периоду)  $f = 0,9$ ; высота решетки  $h_{gr} = 30$  нм; толщина волноводного слоя  $h_{wg} = 50$  нм; показатель преломления решетки и волноводного слоя  $n_{gr} = 3,5$ ; показатель преломления подложки  $n_{sub} = 1,5$ ; показатель преломления материала над структурой  $n_{sup} = 1$ . Указанная скважность обеспечивает высокую добротность резонанса, в то время как выбранная высота решетки позволяет решетке служить антиотражающим покрытием. Это приводит к симметричной лоренцевой форме линии резонанса в спектре отражения, что позволяет использовать рассматриваемую структуру в качестве оптического фильтра.

Для моделирования оптических свойств рассматриваемой структуры использовался так называемый метод супер-периода. При таком подходе рассматривается некоторое большое, но конечное число периодов исходной структуры. Эта конечная структура периодически

продолжается в направлении оси  $x$ , а соседние супер-периоды оптически изолируются с помощью идеально оптически согласованных слоев (т. н. PML-слоёв). Затем дифракция плоской волны на структуре с супер-периодом моделируется с помощью метода фурье-мод [10, 11].

На рис. 16 показано распределение поля, сформированное над структурой в точке  $x = 0$ , когда она освещается нормально падающей TE-поляризованной плоской волной. Отметим, что на рис. 16 показано только распределение отраженного поля без падающей волны. Как видно из рисунка, рассматриваемая структура с переменным периодом имеет резкий пик отражения. При этом при движении вдоль структуры в направлении оси  $x$  спектральное положение пика линейно изменяется. Это означает, что рассматриваемую структуру можно использовать как линейно изменяющийся фильтр.

Согласно рис. 16, спектральная форма резонанса в спектре отражения зависит от скорости изменения периода  $\alpha$ . Чем ниже скорость  $\alpha$ , тем уже пик отражения. Значения полной ширины на полувысоте (FWHM), рассчитанные по рис. 16, составляют 10,3, 7,9, и 2,5 нм при  $\alpha = 1, 1,5$  и  $0$  мкм/мм соответственно. Когда  $\alpha$  стремится к нулю, спектр отраженного поля стремится к результату локально периодической аппроксимации, показанной на рис. 16 сверху. В рамках этого приближения для расчета отражённого поля при заданной координате  $x$  и длине волны  $\lambda$  структура заменяется структурой с постоянным периодом, равным локальному периоду  $d(x)$  структуры в рассматриваемой точке  $x$ . В этом приближении форма линии резонанса в каждой точке  $x$  может быть описана формой линии Фано или даже профилем Лоренца. Однако, когда  $\alpha$  отлично от нуля, форма линии резонанса обретает ярко выраженную асимметричную форму со вторичными максимумами, наблюдаемыми в спектре отражения в области меньших длин волн. Эти вторичные максимумы сильнее для структур с большей скоростью изменения периода  $\alpha$ .

Для описания указанных резонансных свойств дифракционной решётки была разработана теория связанных мод, основанная на пространственно-временной формулировке теории связанных мод [12]:

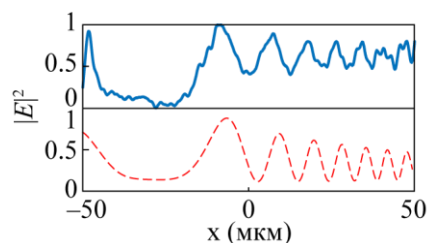
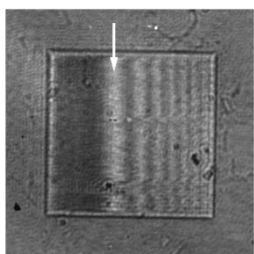
$$\begin{cases} v_g \frac{du}{dx} = [i(\omega - \omega_0) - c_1 + \alpha \beta x] u + c_2 v + c_3, \\ -v_g \frac{dv}{dx} = [i(\omega - \omega_0) - c_1 + \alpha \beta x] v + c_2 u + c_3, \\ E = r_0 + u + v. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $E$  — комплексная амплитуда отражённого поля,  $u$  и  $v$  — комплексные амплитуды мод, распространяющихся в волноводном слое;  $v_g$  — групповая скорость этих мод;  $c_1, c_2, c_3$  — коэффициенты, учитывающие вытекание моды из волновода, связь мод и возбуждение мод падающей плоской волной;  $r_0$  — нерезонансный коэффициент отражения;  $\beta = 2\pi v_g / d_0^2$  — коэффициент, учитывающий изменение периода в направлении оси  $x$ ;  $\omega_0$  — угловая частота, при которой мода возбуждается первым порядком дифракции при нормальном падении

плоской волны. Важно отметить, что указанные параметры модели могут быть найдены на основе вычисления полюсов матрицы рассеяния структуры с постоянными параметрами [12].

Результаты расчёта на основе модели (2) показаны пунктиром на рис. 1б. Как видно из данного рисунка, предложенная модель связанных мод позволяет с высокой точностью описать зависимость спектра отражения от скорости изменения периода  $\alpha$ . Отличия модели от результатов численного моделирования объясняются в первую очередь тем, что в модели нерезонансный коэффициент отражения  $r_0$  положен постоянным.

В качестве дополнительного подтверждения справедливости модели, на рис. 2 приведены результаты эксперимента. В рамках эксперимента была изготовлена дифракционная решётка с линейно изменяющимся периодом (ПММА,  $d_0 = 330$  нм,  $\alpha = 0,25$  мкм/нм,  $f = 0,5$ ,  $h_{gr} = 300$  нм) на волноводном слое ( $\text{TiO}_2$ ,  $h_{wg} = 130$  нм). В качестве подложки использовался плавленый кварц. На рис. 2а представлено измеренное распределение отражённого поля при нормальном падении на структуру ТЕ-поляризованной плоской волны ( $\lambda = 626$  нм). На рисунке виден центральный пик (отмечен стрелкой) и вторичные максимумы. На рис. 2б представлено усреднённое по вертикальному направлению сечение экспериментально измеренного распределения поля (сплошная линия) и предсказание на основе предложенной модели (пунктир). Из рисунка видно, что в рамках предложенной модели (2) весьма точно предсказываются основные оптические свойства исследуемой структуры.



а) Распределение отражённого поля

б) Сечение отражённого поля: эксперимент (сплошная линия, сверху) и модель связанных мод (пунктир, снизу)

**Рис. 2.** Распределение отражённого поля (а) и его сечение (б)

### Благодарность

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 20-12-00120).

### Список источников

- [1] **Zhou, W.** Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics / W. Zhou, D. Zhao, Y.-C. Shuai, H. Yang, S. Chuwongin, A. Chadha, J.-H. Seo, K. X. Wang, V. Liu, Z. Ma, S. Fan // Progress in Quantum Electronics. — 2014. — Vol. 38. — P. 1–74.
- [2] **Hsu, H.-Y.** A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer / H.-Y. Hsu, Y.-H. Lan, C.-S. Huang // IEEE Photonics Journal. — 2018. — Vol. 10. — P. 4500109.

- [3] **Fang, C.** Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge / C. Fang, B. Dai, Z. Li, A. Zahid, Q. Wang, B. Sheng, D. Zhang // *Optics Letters*. — 2016. — Vol. 41. — P. 5302–5305.
- [4] **Ganesh, N.** Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter / N. Ganesh, A. Xiang, N. B. Beltran, D. W. Dobbs, B. T. Cunningham // *Applied Physics Letters*. — 2007. — Vol. 90. — P. 081103.
- [5] **Liu, L.** A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters / L. Liu, H. A. Khan, J. Li, A. C. Hillier, M. Lu // *Nanotechnology*. — 2016. — Vol. 27. — P. 29301.
- [6] **Qian, L.** Nonhomogeneous composite GMR structure to realize increased filtering range / L. Qian, K. Wang, G. Wu, L. Zhu, C. Han, C. Yan // *Optics Express*. — 2018. — Vol. 26. — P. 23602–23612.
- [7] **Qian, L.** Tunable filter with varied-linespacing grating fabricated using holographic recording / L. Qian, K. Wang, C. Han // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2017. — Vol. 29. — P. 925–928.
- [8] **Emadi, A.** Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter / A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, R. Wolffenbuttel // *Optics Express*. — 2012. — Vol. 20. — P. 489–507.
- [9] **Ayerden, N. P.** Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter / N. P. Ayerden, G. de Graaf, R. F. Wolffenbuttel // *Optics Express*. — 2016. — Vol. 24. — P. 2981–3002.
- [10] **Moharam, M. G.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, T. K. Gaylord // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1995. — Vol. 12. — P. 1068–1076.
- [11] **Li, L.** Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings / L. Li // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1996. — Vol. 13. — P. 1024–1035.
- [12] **Bykov, D. A.** Spatiotemporal coupled-mode theory of guided-mode resonant gratings / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich // *Optics Express*. — 2015. — Vol. 23. — P. 19234–19241.

## Resonances in guided-mode resonant gratings with varying period

*D. A. Bykov<sup>1,2</sup>, A. A. Morozov<sup>1</sup>, E. A. Bezus<sup>1,2</sup>, V. V. Podlipnov<sup>1,2</sup>, L. L. Doskolovich<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

Resonant structures with parameters varying along a spatial coordinate are widely used in modern optical sensors. In this work, we study guided-mode resonant gratings with a linearly varying period. Such structures perform spectral filtering with the frequency of the resonant reflection peak changing along the structure. Using rigorous numerical simulations, we study how the line shape of the resonance depends on the period change rate. We developed a spatiotemporal coupled-mode theory describing the optical properties of the considered structure. The theoretical predictions are in good agreement with the numerical simulation results and with the results of the performed experiment.

*Keywords:* Optical filter, Grating, Resonance, Eigenmode.

# Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на базе интерференционной микроструктуры

А. А. Рыбак<sup>1,2</sup>, С. А. Кузнецов<sup>1,5</sup>, Н. А. Николаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, России

<sup>3</sup> Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «КТИПМ», Новосибирск, Россия

Рассмотрен подход к созданию терагерцового узкополосного пропускающего фильтра на основе интерференционной микроструктуры (эталон Фабри — Перо), который представляет из себя полипропиленовую пленку с нанесённой на обе стороны частотно-избирательной поверхностью в форме квадратных прорезей в металлическом слое. С помощью численного моделирования пропускания предложенной структуры определен оптимум её геометрических параметров для достижения полной ширины на полувысоте фильтра менее 4%. Полученный фильтр может найти применение в астрономии, в системах миллиметровой связи в открытом пространстве и в импульсной терагерцовой спектроскопии, для которой проведена апробация его применения.

**Ключевые слова:** квазиоптические микроструктуры, частотно-избирательные поверхности, эталон Фабри — Перо, полосовой фильтр, терагерцовый диапазон.

*Цитирование:* Рыбак, А. А. Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на базе интерференционной микроструктуры / А. А. Рыбак, С. А. Кузнецов, Н. А. Николаев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 373–378.

## Введение

Прогресс технологий терагерцового (ТГц) спектрального диапазона необходим для эволюционного развития систем связи и передачи больших объемов данных; разработки новых подходов диагностики и скрининга в медицине; внедрения передовых методов контроля качества продукции на производстве, а также в других областях. ТГц излучение является квазиоптическим и обладает высокой степенью направленности по сравнению с радиочастотами из-за субмиллиметровой длины волны. В этой связи разработка оптических элементов, которые могут найти применение в вышеописанных областях, является актуальной задачей. Так, например, высокой потребностью могут обладать квазиоптические узкополосные пропускающие полосовые фильтры (ППФ).

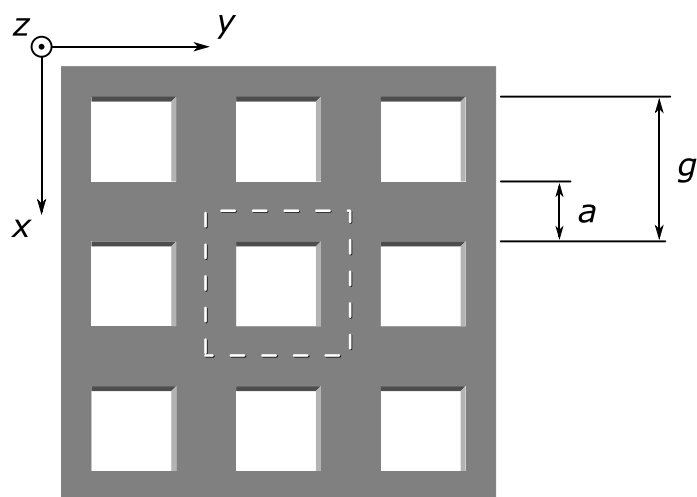
Распространенный подход к разработке квазиоптических фильтров основан на применении метаповерхностей или частотно-избирательных поверхностей (ЧИП). В общем случае они представляют собой искусственно-структурированные металлодиэлектрические среды с характерным периодом расположения составляющих их элементарных ячеек меньше или много меньше рабочей длины волны. Отклик метаматериала на электромагнитное возбуждение определяется структурой индуцируемых в нем токов, которые напрямую зависят от геометрии ячеек и от диэлектрических свойств окружения (подложки).

Распространен дизайн пропускающих фильтров на основе ЧИП, состоящей из субволновых резонансных щелевых элементов дипольного типа. Такие фильтры с шириной на полувысоте 10–20% были описаны авторами ранее [1–4]. Щелевые элементы ЧИП работают на локализованном плазмонном резонансе, возбуждаемом локальными стоячими волнами на щелях [5–7]. Ширина фильтрующей полосы в них убывает с уменьшением ширины щелей по квазилинейному закону [8–9]. Однако, пиковое пропускание фильтра быстро деградирует при сужении щели, что обусловлено возрастанием омических потерь на частоте резонанса и рассогласованием импеданса сетки и свободного пространства, приводящего к возрастанию коэффициента отражения. Поэтому уменьшение полосы ППФ ниже 10% не является целесообразным при стремлении к сохранению высокого коэффициента пропускания фильтра.

В данной работе рассмотрен подход к созданию узкополосного ППФ на основе эталона Фабри — Перо с сеточными рефлекторами (фильтр Фабри — Перо, ФФП), который в первом порядке должен обеспечивать узкую полосу пропускания. Подавление резонансов высших порядков реализовано совмещением ФФП с широкополосным ППФ, описанным ранее [1–4]. Предложенный подход и разработанная ЧИП могут быть адаптированы на любую частоту ТГц спектра в достаточно широких пределах от 0,1 до 3 ТГц. Однако в нашем случае стоит задача мониторинга методами ТГц спектроскопии поглощения газа монооксида углерода, для чего выбрана линия в окрестности 806 ГГц, которая попадает в локальное окно прозрачности атмосферы.

### **1. Дизайн фильтра Фабри — Перо**

В качестве базового дизайна ЧИП ФФП использована «классическая» геометрия квадратно-упакованных ячеек с прорезями квадратной формы (рис. 1), что обеспечивает отсутствие локализованных плазмонных резонансов вплоть до точки дифракции. АЧХ пропускания подобных сеток – плавно возрастающая функция, что является необходимым критерием для сохранения селективных характеристик ФФП в пределах его рабочей полосы. ЧИП размещена с двух сторон на поверхностях полипропиленовой (ПП) пленки, обеспечивающей фиксацию зазора между рефлекторами и имеющей низкий тангенс диэлектрических потерь.



**Рис.1.** Структура ЧИП, состоящая из металлических (серый цвет) сеточных отражателей со щелями в форме квадратных отверстий (белый цвет). Где  $g$  — латеральный период сетки,  $a$  — ширина металлических перемычек между ячейками. Пунктиром выделена область элементарной ячейки структуры.

Комплексная диэлектрическая проницаемость ПП измерена ранее на импульсном ТГц спектрометре и задавалась равной  $\varepsilon = 2,28 \times (1 - j10^{-3})$ . Проводимость и толщина металла сеток заданы как  $1,5 \times 10^7$  Ом/м и 0,4 мкм, соответственно. Толщина  $d$  ПП пленки задавалась в окрестности 112 мкм, что связано с доступными образцами плёнок и близостью данного значения к длине волны  $\lambda_0$  фундаментального резонанса ФФП, который по условию задачи должен совпадать с длиной волны излучения 372 мкм, соответствующей частоте 806 ГГц:  $d \approx \lambda_0/2n$ , где  $n = \text{Re}\sqrt{\varepsilon}$ . Для параметризации структуры нами введен также параметр  $p = g/\lambda_0$ .

Перед нами стояла задача найти такие параметры  $p$  и  $a/g$  структуры, представленной на рис. 1., чтобы обеспечить полную ширину на полувысоте контура пропускания ФФП в нулевом порядке менее 4%.

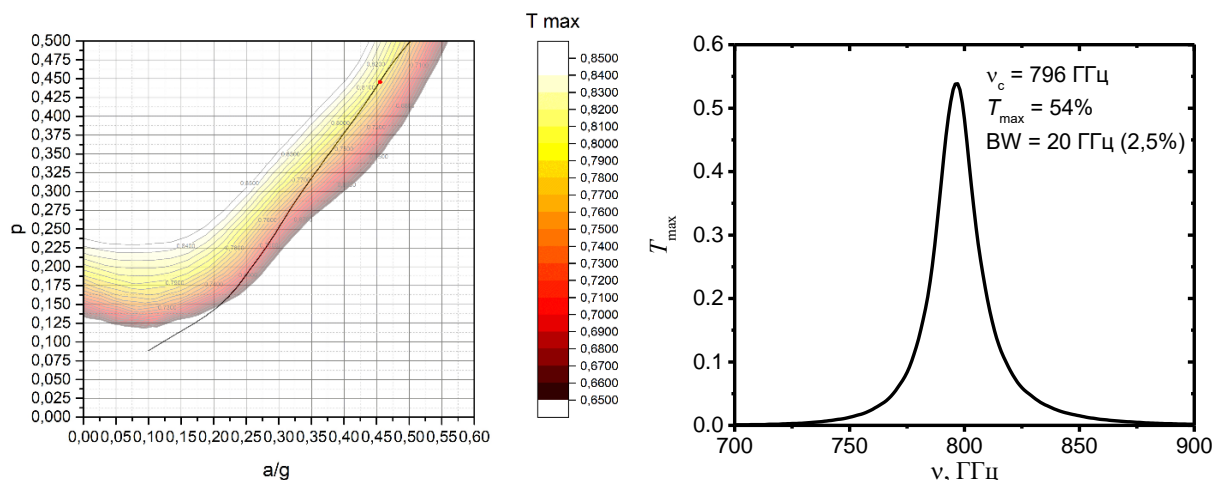
Расчёт и оптимизация структуры выполнены с использованием коммерческого пакета трехмерного электродинамического моделирования ANSYS® HFSS R19, использующий метод конечных элементов для численного интегрирования уравнений Максвелла в частотной области. При моделировании ФФП как регулярно-периодической структуры использован режим портов Флоке с периодическими граничными условиями («Master-Slave» Boundary Conditions), применяемыми к элементарной ячейке ФФП (рис. 1). Порты Флоке располагались на расстоянии равном удвоенному латеральному периоду ячейки структуры ( $2g$ ) сверху и снизу от её поверхностей по оси  $z$ .

## 2. Результаты

Перебирая параметры  $p$  и  $a/g$  описанной структуры с шагом 0,1 в диапазоне от 0,05 до 0,8 был получен набор спектров пропускания полученного ФФП в окрестности интересующей частоты, представляющих из себя единичный пик пропускания нулевого порядка. Далее определялись параметры этого пика: пропускание в точке максимума  $T_{\text{max}}$  и ширина на



полувысоте  $BW = \Delta\nu/\nu$ , где  $\nu$  — частота. Полученные значения были отложены на двумерной контурной карте рис.2. Промежуточные значения на карте получены с помощью сплайн интерполяции.



**Рис. 2.** Слева: двумерная контурная карта пропускания максимума нулевого порядка  $T_{\max}$  (цветной градиент) ФФП в зависимости от параметров структуры  $p$  и  $a/g$ , предоставленной на рис. 1. Сплошная линия (черный цвет) контур аналогичной карты параметра  $BW$ , соответствующий значению 4%. Справа: спектр пропускания результирующего фильтра, состоящего из разработанного ФФП с параметрами  $p = 0,448$  и  $a/g = 0,457$  и ППФ с центральной частотой 800 ГГц и шириной полосы 20%.

На кривой пересечения двух функций  $T_{\max}(p, a/g)$  и  $BW(p, a/g) = 4\%$  было найдено максимальное значение пропускания ФФП:  $\text{Max}[T_{\max}(p, a/g)]$ . Иначе говоря найден максимум функции  $T_{\max}(p, a/g)$  на черной сплошной кривой отображенной на рис. 2 слева. В результате определены значения параметров, соответствующие заданному условию на ширину полосы пропускания фильтра, которые составили:  $p = 0,448$  и  $a/g = 0,457$ . На рис. 2 справа приведены спектр пропускания и параметры результирующего узкополосного пропускающего фильтра, состоящего из разработанного ФФП и ППФ с шириной полосы 20%. Заниженная частота максимума пропускания фильтра не является проблемой, так как может быть подстроена в сторону высоких частот небольшим закосом всей структуры по отношению к направлению распространения ТГц волны.

### Заключение

Предложен дизайн терагерцового узкополосного пропускающего фильтра на основе эталона Фабри — Перо, который представляет из себя полипропиленовую пленку 112 мкм с нанесённой с обеих сторон частотно-избирательной поверхностью в форме квадратных прорезей в металлическом алюминиевом слое толщиной 0,4 мкм. С помощью численного моделирования пропускания предложенной структуры определены оптимальные значения геометрических параметров для достижения полной ширины на полувысоте фильтра  $BW < 4\%$ , которые составили: латеральный период структуры —  $g = 166,7$  мкм, ширина перемычки между квадратными прорезями —  $a = 76,2$  мкм. В результате фильтр обладает

следующими характеристиками: центральная частота — 796 ГГц, пропускание в максимуме — 54%, BW = 20 ГГц (2,5%). Полученный дизайн может быть адаптирован для решения различного рода задач в сфере науки и техники. В нашем случае разработанный фильтр найдет применение в спектроскопии поглощения газа монооксида углерода, на линии 806 ГГц.

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 20-32-90137) и Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSUS-2020-0029). Авторы выражают благодарность ЦКП «ВТАН НГУ» за предоставленное для выполнения проекта вычислительное оборудование.

### Список литературы

- [1] **Thumm, M. K. A.** Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM / M. K. A. Thumm, A. V. Arzhannikov, V. T. Astrelin, et al. // *Terahertz Sci. and Tech.* — 2012. — Vol. 5. — No.1. — P. 18–39.
- [2] **Аржанников, А. В.** / Диагностический комплекс для исследований генерации субтерагерцового излучения при пучково-плазменном взаимодействии на установке ГОЛ-3 / А. В. Аржанников, А. В. Бурдаков, Л. Н. Вячеславов и др. // *Физика плазмы.* — 2012. — Том. 38. — № 6. — С. 496–505.
- [3] **Kuznetsov, S. A.** Microstructured Frequency Selective Quasi-Optical Components for Submillimeter-Wave Applications / S. A. Kuznetsov, M. A. Astafyev, A. V. Gelfand, A. V. Arzhannikov // *Proc. 44th European Microwave Conf. (EuMC 2014), Rome, Italy, October 6–9.* — 2014. — Article no. 6986576. — P. 881–884.
- [4] **Кузнецов, С. А.** Исследование спектральных характеристик микроструктурных квазиоптических полосовых фильтров субтерагерцового диапазона / С. А. Кузнецов, А. В. Гельфанд // *Известия высших учебных заведений. Физика.* — 2015. — Том. 58. — № 11. — С. 113–120.
- [5] **Kuznetsov, S. A.** Microstructured Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications / S. A. Kuznetsov, A. V. Arzhannikov, A. V. Gelfand et al. // *Вестник НГУ. Серия: Физика,* — 2010. — Том. 5. — № 4. — С. 79–90.
- [6] **Munk, B.** *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* / B. Munk. — J. Wiley & Sons, 2000.
- [7] **Касьянов, А. О.** Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения / А. О. Касьянов, В. А. Обуховец // *Антенны.* — 2005. — №9. — С. 4–12.
- [8] **Möller, K. D.** Cross-shaped bandpass filters for the near- and mid-infrared wavelength regions / K. D. Möller, J. B. Warren, J. B. Heaney, and C. Kotecki // *Appl. Opt.* — 1996. — Vol. 35. — P. 6210–6215
- [9] **Chase S. T.** Resonant array bandpass filters for the far infrared / S. T. Chase and R. D. Joseph. // *Appl. Opt.* — 1983. — Vol. 22. — P. 1775–1779.

# Terahertz narrow-bandpass filter based on an interference microstructure

*A. A. Rybak<sup>1,2</sup>, S. A. Kuznetsov<sup>1,3</sup>, N. A. Nikolaev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Division of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics «TDIAM», Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Here we present a design of a terahertz narrow-bandpass filter based on an interference microstructure (Fabry – Perot etalon). It is based on a polypropylene film with a frequency-selective surface deposited on both sides in the form of square slots in a metal layer. With the help of numerical simulation of the transmission of the proposed structure, the optimum of its geometric parameters was determined to achieve a full width at half maximum of the filter less than 4%. The resulting filter can be used in astronomy, in free space millimeter-wave communication systems, and in terahertz spectroscopy, for which its application has been tested.

*Keywords:* Quasi-optical microstructures, Frequency-selective surfaces, Fabry – Perot etalon, Band-pass filter, Terahertz range.

# Генерация и исследование терагерцовых вихревых поверхностных плазмонов на цилиндрической поверхности

Н. Д. Осинцева<sup>1,2</sup>, Б. А. Князев<sup>1,2</sup>, Ю. Ю. Чопорова<sup>1</sup>, В. В. Герасимов<sup>1,2</sup>, В. С. Павельев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского Отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», Самара, Россия

Терагерцовый (ТГц) диапазон является перспективным инструментом в развитии области передачи информации. Одной из методик применения данного вида излучения для телекоммуникации является возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). ППП, распространяющиеся вдоль границ раздела сред «металл-диэлектрик», играют важную роль во многих оптических явлениях и могут использоваться в системах интегральной оптики в качестве носителей информации и энергии. В работе впервые были экспериментально получены вихревые ТГц ППП на цилиндрической поверхности, для генерации которых применялись идеальные бесселевы пучки, сформированные фазовыми аксиконами. Исследованы характеристики ППП, продемонстрировано их вращение, показано, что волны распространяются отдельно, не взаимодействуя с соседними плазмонами.

*Ключевые слова:* Терагерцовое излучение, дифракционные оптические элементы, вихревые пучки, поверхностные плазмон-поляритоны, Фазовый аксикон.

*Цитирование:* Осинцева, Н. Д. Генерация и исследование терагерцовых вихревых поверхностных плазмонов на цилиндрической поверхности / Н. Д. Осинцева, Б. А. Князев, Ю. Ю. Чопорова, В. В. Герасимов, В. С. Павельев // NOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 379–382.

## Введение

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) представляют собой распространяющиеся волны электронных колебаний на границе раздела металла и диэлектрика. ППП хорошо исследованы в видимом и среднем инфракрасном диапазонах. В терагерцовом (ТГц) же диапазоне исследования начались относительно недавно, но число работ в этом направлении непрерывно растет. Причиной внимания к ТГц ППП является потенциально широкая область возможных применений. Преимуществом ТГц излучения для плазмонов является большая длина распространения (десятки сантиметров), по сравнению с видимым диапазоном (десятки микрометров), и высокая частота, что позволяет говорить об увеличении скорости в обработке и передаче информации в микросхемах, биосенсорах и др. Таким образом интерес представляет генерация ППП на проводах, т.е. аксиальной поверхности, как альтернатива волноводам в миниатюрных интегрированных оптических устройствах [1]. Несмотря на то, что при распространении плазмонов по цилиндрической поверхности проводников наблюдаются большие потери в сравнении с плоскими поверхностями, ими можно

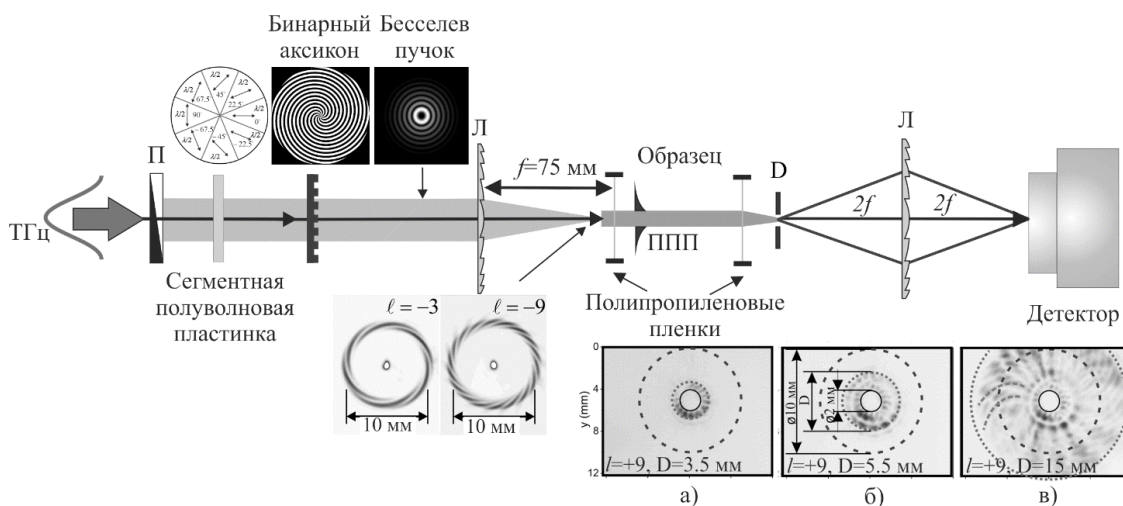
пренебречь в приложениях, указанных выше. Данный фактор незначителен по сравнению с преимуществами мультиплексирования каналов данных что может обеспечить формирование вихревых пучков.

### **Используемые методы и подходы**

Обязательным условием создания поверхностных плазмонов является наличие поляризации ортогональной поверхности распространения. В случае цилиндрических поверхностей необходима радиально поляризованная волна. В данной работе радиально поляризованный пучок Гауссовой моды трансформировался в вихревой бесселев пучок с помощью кремниевых бинарных аксиконов с закрученностями  $l$  [2]. С увеличением порядка топологического заряда пучка, увеличивается его диаметр. Данный факт ограничивает использование разных аксиконов для одного образца, обладающего фиксированным диаметром. В результате возникает необходимость в формировании пучков с заданным диаметром. Эта задача была решена формированием «идеальных» пучков, характеризующихся размером пучка, не зависящим от величины закрученности. В качестве образца использовался металлический цилиндр диаметром 10 мм, покрытый слоем диэлектрика ZnS.

### **Результаты и заключение**

Показаны результаты генерации поверхностных-плазмон поляритонов с закрученностями  $\pm 3$  и  $\pm 9$  на металлических цилиндрах с покрытием ZnS. Идеальный бесселев пучок диаметром 10 мм локализовался на входной торец образца. Ирисовая диафрагма на кончике цилиндра ограничивала соскальзывающее с образца излучение. На полученных результатах (рис.1 а, б, в) снятых в плоскости выходного торца видно, что размер внутреннего кольца не меняется даже при уменьшении диаметра диафрагмы до наименьшего размера  $D = 3,5$  мм. В таком случае попадание всех типов свободного излучения в кольцевое отверстие практически невозможно. Мы связываем это излучение с дифракцией плазмонов на краю цилиндра и образованием свободных волн. Решающим доказательством что наблюдаемый сигнал является плазмонами, была зависимость их интенсивности от поляризации освещающего излучения. При изменении поляризации входного пучка с радиальной на азимутальную, выходная интенсивность снижалась практически до нуля. Остаточная интенсивность объясняется частичным пропусканием радиальной поляризации полуволновой пластинкой.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для создания вихревых ППП на цилиндрическом образце. П- поляризатор, Л – киноформная линза с  $f=75$  мм, D – ирисовая диафрагма. Снизу: распределения интенсивности полученные с кончика образца при диаметре диафрагмы 3,5 мм (а), 5,5 мм (б) и 15 мм (в)

На изображениях полученных для  $l=+9$  видно, что количество максимумов равно 18, что соответствует количеству спиралей в «идеальном» пучке, освещающем цилиндр (рис. 1 а, б, в). Это означает, что плазмоны генерируются локально, в точках пересечения возбуждающего излучения с краем цилиндра, и распространяются вдоль своих траекторий, не перепутываясь с соседними плазмонами. Ранее, подобное поведение плазмонов исследовалось при их распространении по образующей цилиндрической поверхности [3].

Обнаруженное вне первого кольца излучение является вихревым пучком, прошедшим начало сужающейся части цилиндра. Он наблюдается на выходе цилиндра во втором кольце, состоящем из 18 спиральных «хвостов», закрученных влево или вправо в зависимости от знака топологического заряда. Эксперимент с пропусканием идеального пучка через щель перед входным торцом цилиндра, так же показал возбуждение и поворот плазмонов. ППП вращаются в том же направлении что и освещающий пучок, а величина угла растет с увеличением топологического заряда. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что пучки являются закрученными, и следовательно плазмоны так же обладают орбитальным угловым моментом [4].

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-20202) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

### Список источников

- [1] **Dickson, R. M.** Unidirectional plasmon propagation in metallic nanowires / R. M. Dickson, L. A. Lyon // The Journal of Physical Chemistry B. – 2000. – Vol. 104. – №. 26. – P. 6095–6098. – DOI: 0.1021/jp001435b.

- [2] **Volodkin, B.** Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation / B. Volodkin, Y. Choporova, B. Knyazev, G. Kulipanov, V. Pavelyev, V. Soifer, N. Vinokurov // *Optical and Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 48. – № 4. P. 1-9. DOI: 10.1007/s11082-016-0496-z.
- [3] **Knyazev, B.** Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive bessel beams with orbital angular momentum / B. Knyazev, Y. Choporova, M. Mitkov, V. Pavelyev, B. Volodkin // *Physical review letters*. – 2015. – Vol. 115. – № 16. P. 163901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.163901.
- [4] **Gerasimov, V. V.** / Vortex surface plasmon polaritons on a cylindrical waveguide: generation, propagation, and diffraction / V. V. Gerasimov, O. E. Kameshkov, B. A. Knyazev, N. D. Osintseva, V. S. Pavelyev // *Journal of Optics*. – 2021. – Vol. 23. – №. 10. – P. 10LT01. DOI: 10.1088/2040-8986/ac1fc4

## Generation and investigation of terahertz vortex surface plasmon polaritons on cylindrical surface

*A. B. Ivanova<sup>1</sup>, V. G. Petrov<sup>2</sup>, D. E. Sidorov<sup>1,2</sup>, N. D. Osintseva<sup>1,2</sup>, Yu. Yu. Choporova<sup>1</sup>, B. A. Knyazev<sup>1,2</sup>, V. V. Gerasimov<sup>1,2</sup>, V. S. Pavelyev<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAN, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

The terahertz (THz) range is a promising tool in the development of the information transmission field. One of the methods for using this type of radiation for telecommunications is the excitation of surface plasmon polaritons (SPPs). SPPs propagating along the "metall-insulator" medium interfaces play a big part in many optical phenomena and can be used in integrated optics systems as information and energy carriers. In this work for the first-time vortex THz SPPs on cylindrical surface were experimentally obtained. Bessel beams formed by phase axicons were used for its generation. The characteristics of the SPPs were studied, its rotation was demonstrated, as well as the ability to propagate along its own trajectory without interacting with neighboring plasmons.

*Keywords:* Terahertz radiation, Diffraction optical elements, Vortex beams, Surface plasmon-polaritons, Phase axicon.

# Влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции

П. А. Хорин<sup>1</sup>, С. Н. Хонина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН, Самара, Россия

В данной работе выполнено исследование влияния разных типов отклонений формы и положения спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции. Рассмотрено действие идеальной спиральной фазовой пластинки и нелинейного спирального дифракционного оптического элемента, а также показано влияние несоосности входного пучка и элемента на свойства формируемого распределения интенсивности. В результате анализа получено, что отклонения 3D формы спиральной микроструктуры незначительно влияют на фазу вихревого пучка. Показано влияние высоты, радиуса и дискретизации по полярному углу  $\varphi$  оптического элемента на распределения интенсивности, т.е. структуру пучка. Несоосность в оптической системе приводит к значительному искажению структуры вихревого пучка.

*Ключевые слова:* Обобщённая спиральная фазовая пластинка, Вихревые пучки, Ближняя зона дифракции.

Цитирование: **Хорин, П. А.** Влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции / П. А. Хорин, С. Н. Хонина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 383–387.

## Введение

В 1992 году в работе [1] было показано, что оптические вихревые пучки со спиральным волновым фронтом обладают орбитальным угловым моментом (ОУМ). Однако при изготовлении оптических элементов [2], особенно с микроструктурой, таких как метаповерхности или оптические микроэлементы [3], полученный прототип может не вполне совпадать с рассчитанной математической моделью, что приводит к изменению свойств формируемого лазерного пучка [4].

## 1. Численное моделирование

В качестве оптического элемента рассматривается как линейная [5], так и нелинейная фазовая пластинка [6]. Известно, что высота оптического элемента должна быть согласована с длиной волны  $\lambda$  падающего пучка. Соотношение для расчёта высоты элемента  $h$  имеет следующий вид:  $h(x, y) = \psi(x, y) / k(n-1)$ , где  $\psi(x, y) = \alpha(\tan^{-1}(y/x))^q$  – фаза оптического



элемента,  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число,  $n$  – показатель преломления материала, из которого изготовлен элемент,  $\alpha$  – топологический заряд,  $q$  – положительное целое число.

В качестве входного сигнала используется Гауссов пучок, который можно описать формулой:  $G_\sigma(x, y) = -(x^2 + y^2) / \sigma^2$ , где  $\sigma$  – радиус перетяжки пучка.

## 2. Численное моделирование

Для анализа влияния нелинейности профиля СФП было выполнено моделирование действия обобщённой СФП в ближней зоне дифракции, регистрация интенсивности осуществлялась в одной плоскости  $z_0$ .

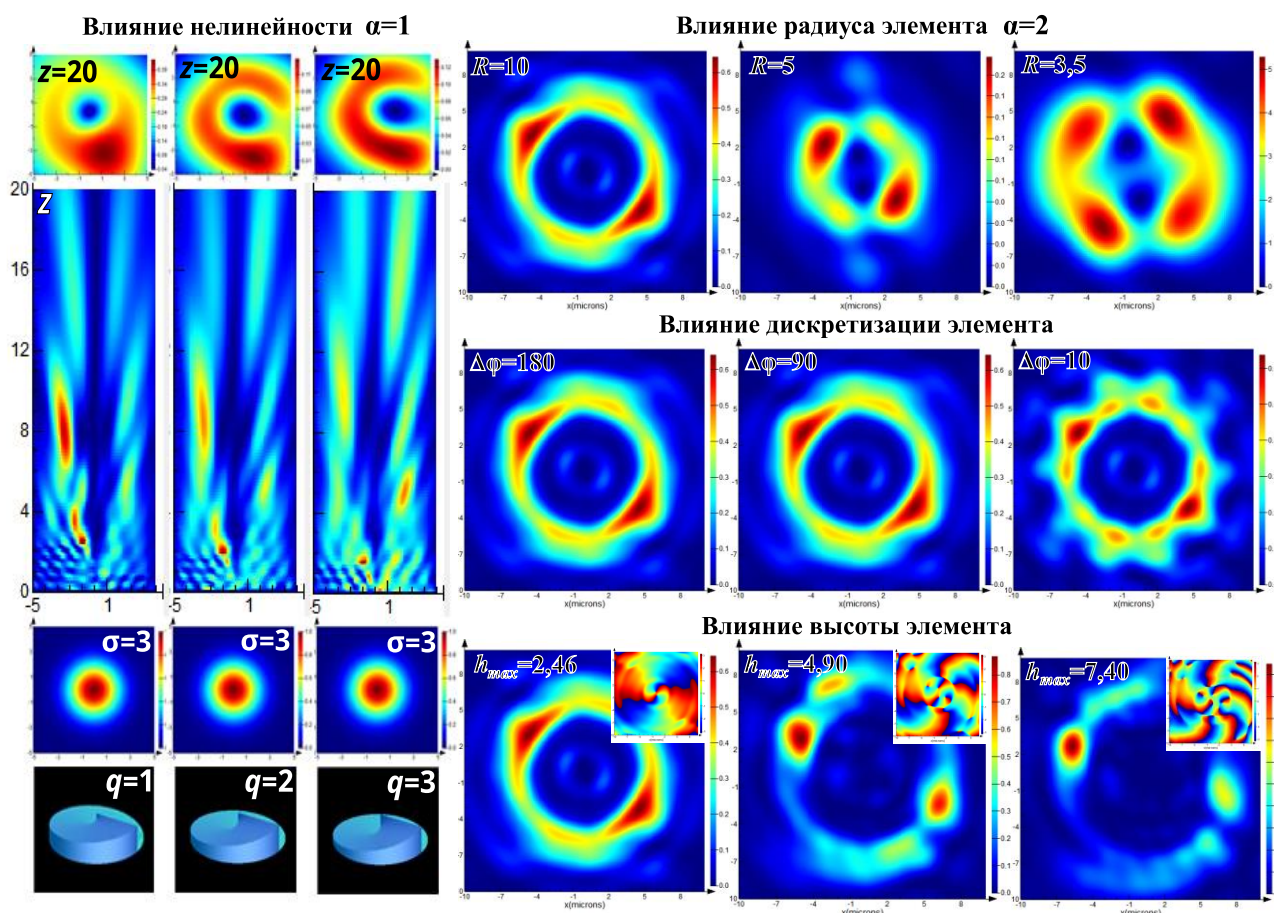


Рис. 1. Результаты численного моделирования действия СФП. Влияние нелинейности, радиуса, дискретизации и высоты элемента на свойства формируемого пучка

Из рисунка 1 видно, что действие классического элемента ( $\alpha=1$ ), отличающегося только уровнем линейной зависимости, приводит к формированию вихревого пучка в ближней зоне дифракции. Однако при изменении линейности ( $q=2, q=3$ ) оптического элемента в плоскости  $z=20$  мкм детектируется незамкнутое кольцо.

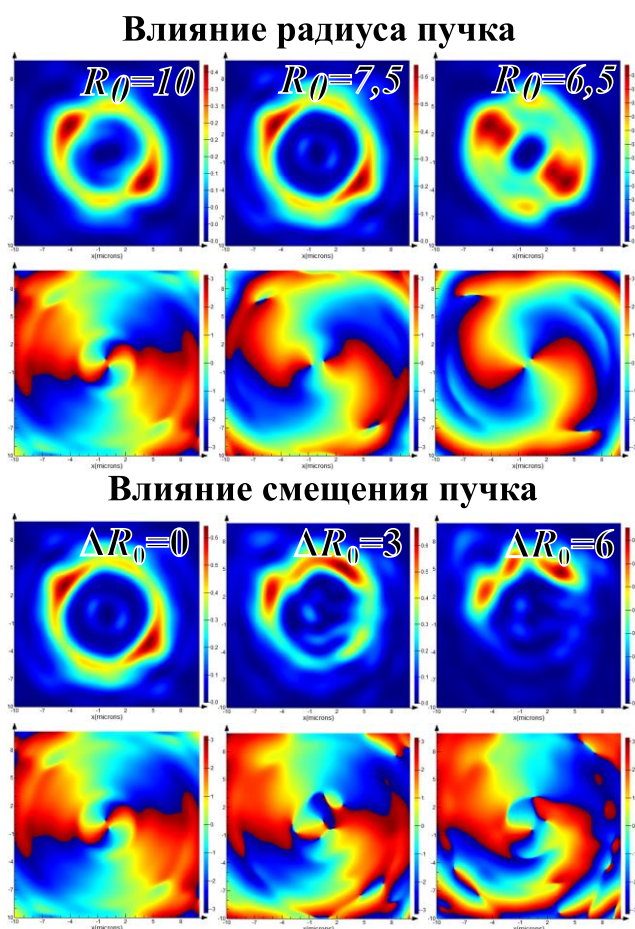
Далее было выполнено исследование влияния высоты, радиуса и дискретизации по полярному углу  $\varphi$  оптического элемента. Результаты расчетов приведены на рисунке 1, из которых следует, что при моделировании действия классической СФП ( $q=1, \alpha=2$ ) радиус элемента влияет на ширину кольца вихревого пучка.

Исследование влияния дискретизации элемента  $\Delta\varphi$  по полярному углу  $\varphi$  показало, что уменьшение количества секторов в 2 раза с 180 до 90 незначительно влияет на структуру вихревого пучка.

Высота элемента  $h_{\max}$  значительно влияет на распределение интенсивности и фазы сформированного пучка в ближней зоне. При изменении высоты элемента вихревая фаза пучка сохраняется, однако изменяется топологический заряд кратно параметру  $h_{\max}$ .

В дополнение к анализу влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры было исследовано влияние радиуса и смещение входного Гауссова пучка  $G_c(x, y)$  на свойства формируемого вихревого пучка. Из рисунка 2 видно, что радиус пучка  $R_0$  влияет на ширину кольца. Фаза сохраняет свои вихревые свойства и практически не изменяется в зависимости от радиуса входного пучка.

Для анализа влияния несносности входного пучка и оптического элемента, проведено смещение центра Гауссова пучка вдоль оси X на  $\Delta R_0$  мкм. На основе численных расчетов получено, что структура пучка сильно изменяются при несносности. Из графиков на рисунке 2 видно, что при увеличении смещения  $\Delta R_0$  структура вихревого пучка в виде кольца начинает распадаться.



**Рис. 2.** Результаты численного моделирования действия СФП. Влияние радиуса и смещения пучка на свойства формируемого пучка.

## Заключение

В работе проведено исследование влияния разных типов отклонений формы и положения спиральной микроструктуры на свойства вихревого пучка в ближней зоне дифракции. В результате анализа получено, что отклонения 3D формы спиральной микроструктуры незначительно влияют на вихревые свойства формируемого пучка, но в большей степени влияет на его структуру. По распределению интенсивности в ближней зоне дифракции можно сделать вывод, что каждый из рассмотренных параметров приводит к перераспределению энергии.

Что касается влияния радиуса входного Гауссова пучка и его смещения относительно центра оптического элемента, то оба этих параметра не меняют фазу сформированного вихревого пучка и его свойства. Несоосность в оптической системе приводит к потере структуры кольца вихревого пучка.

Полученные результаты могут быть полезны при использовании подстраиваемых оптических элементов [7], а также микроструктур, формируемых в фоточувствительных средах [8].

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-20075) и в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021-2030 годы в рамках программы "Приоритет-2030" при поддержке Правительства Самарской области.

## Список источников

- [1] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman // Phys. Rev. A. – 1992. – Vol. 45. – P. 8185-8189.
- [2] Oemrawsingh, S. S. R. Production and characterization of spiral phase plates for optical wave-lengths / S. S. R. Oemrawsingh, J. A. W. van Houwelingen, E. R. Eliel, J. P. Woerdman, E. J. K. Verstegen, J. G. Kloosterboer and G. W. Hooft. // Appl. Opt. – 2004. – Vol. 43. – P.688–694.
- [3] Yu, Y. J. Focusing characteristics of optical fiber axicon microlens for near-field spectroscopy: dependence of tip apex angle / Y. J. Yu, H. Noh, M. H. Hong, H. R. Noh, Y. Arakawa, and W. Jhe // Opt. Commun. – 2006. – Vol. 267(1). – P.264-270.
- [4] M. W. Beijersbergen, . Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate / M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen and J. P. Woerdman // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 112. – P. 321–327.
- [5] Li, P. Spiral autofocusing Airy beams carrying power-exponent-phase vortices / P. Li, S. Liu, T. Peng, G. Xie, X. Gan, and J. Zhao // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22. – P. 7598–7606.
- [6] Rotschild, C. Adjustable spiral phase plate / C. Rotschild, S. Zommer, S. Moed, O. Hershcovitz and S. G. Lipson // Appl. Opt. – 2004. – Vol. 43. – P. 2397–2399.
- [7] Priimagi, A. Azopolymer-based micro- and nanopatterning for photonic applications / A. Priimagi, A. Shevchenko // J. Polym. Sci. B Polym. Phys. – 2014. – Vol. 52. – P.163–182.

- [8] Syubaev, S. Chirality of laser-printed plasmonic nanoneedles tunable by tailoring spiralshape pulses / S. Syubaev S., A. Zhizhchenko, O. Vitrik, A. Porfirev, S. Fomchenkov, S. Khonina, S. Kudryashov, A. Kuchmizhak // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 470. – P. 526-534.

## **Influences of deviations of the 3D form of the spiral microstructure on the properties of the formed vortex beam in the near diffraction zone**

*P. A. Khorin<sup>1</sup>, S. N. Khonina<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Samara National Research University, Samara 443086, Russia

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of RAS—Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara 443001, Russia.

The effect of various types of deviations in the shape and position of the helical microstructure on the properties of the formed vortex beam in the near diffraction zone was studied. The effect of an ideal helical phase plate and a nonlinear helical diffractive optical element is considered, and the influence of misalignment of the input beam and the element on the properties of the formed intensity distribution is shown. As a result of the analysis, it was found that deviations of the 3D shape of the helical microstructure have little effect on the phase of the vortex beam. The influence of the height, radius, and sampling over the polar angle  $\varphi$  of the optical element on the intensity distributions is shown, i.e. beam structure. Misalignment in the optical system leads to significant distortion of the vortex beam structure.

*Keywords:* Diffractive optics, Generalized spiral phase plate, Vortex beams, Near diffraction zone.

# Исследование фазовых спектров спуф локализованных плазмонных резонансов, возбуждаемых на спиральных двумерных метаматериалах с тонкими диэлектрическими покрытиями в терагерцовом диапазоне частот

О. Э. Камешков, В. В. Герасимов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия  
Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия

Терагерцовые плазмонные сенсоры считаются перспективной технологией в области биомедицины благодаря их сверхчувствительным функциям мониторинга в режиме реального времени без использования меток. Их широкое применение по-прежнему ограничено веществами с малыми потерями, методом характеристики вещества на одной резонансной частоте и низкой чувствительностью сенсоров. В данной работе проводится исследование сенсоров на основе спиральных алюминиевых дисков на полипропиленовой подложке, которые позволяют возбуждать спуф локализованные плазмонные резонансы (ЛПР) в терагерцовом диапазоне частот аналогичные по свойствам классическим ЛПР. В работе показано численно и экспериментально, что использование частотного фазового спектра вместо амплитудного позволяет увеличить добротность данного вида сенсора при измерении показателя преломления тонких диэлектрических покрытий.

*Ключевые слова:* Терагерцовые сенсоры, Спиральные метаматериалы, Спуф локализованный плазмонный резонанс, Тонкие пленки.

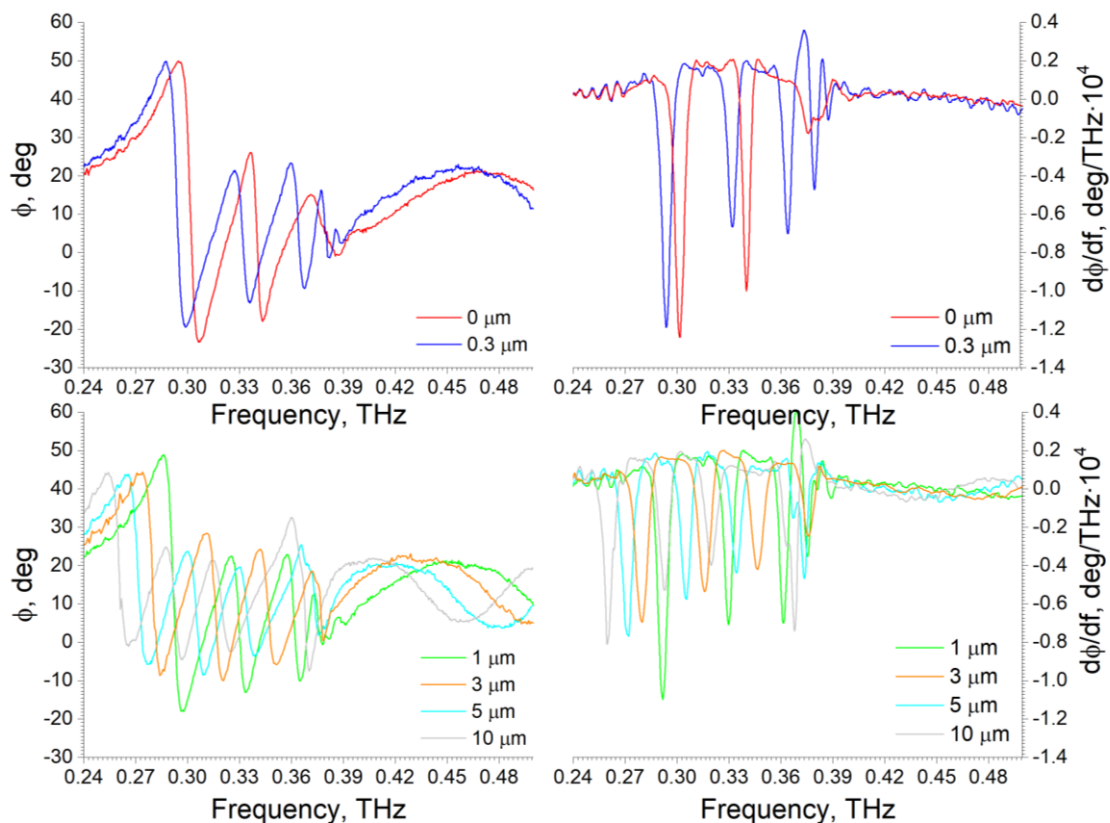
*Цитирование:* Камешков, О. Э. Исследование фазовых спектров спуф локализованных плазмонных резонансов, возбуждаемых на спиральных двумерных метаматериалах с тонкими диэлектрическими покрытиями в терагерцовом диапазоне частот / О. Э. Камешков, В. В. Герасимов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 388–390.

В видимом диапазоне локализованные поверхностные плазмонные резонансы (ЛППР) представляют собой локализованные колебания свободных электронов в металлических наночастицах. ЛППР позволяют концентрировать и усиливать электромагнитное излучение на поверхности частицы в наномасштабе. В терагерцовом диапазоне частот классические ЛППР не возбуждаются из-за высоких значений диэлектрических проницаемостей металла, но их свойства можно воспроизвести, используя специальные двумерные метаматериалы.

В 2012 году Pors и др. [1] показали, что электромагнитные резонансы, поддерживаемые закрытыми 2D гофрированными металлическими цилиндрами с идеальной проводимостью, имитируют ЛППР видимого диапазона, названные спуф ЛППР (СЛППР). В 2014 г. Cui et.al. продемонстрировали экспериментально, что субволновая решетка, сжатая и свернутая в замкнутую спиральную поверхность, также поддерживают магнитные СЛППР [2]. За этими двумя работами последовало большое количество работ, посвященных спуф локализованным плазмонам в терагерцовом и микроволновом диапазонах частот. Существует около 36 статей,

в которых разные авторы описывают модификации и улучшения металлических цилиндрических метаматериалов, и 13 статей о спиральных метаматериалах. Из всех этих работ нам интересны те, что посвящены их сенсорным возможностям и таких экспериментальных работ только две [3-4]. Zhou и др. численно и экспериментально сравнивали чувствительность различных мод, возбуждаемых на гофрированных металлических цилиндрах с помощью плоского волновода [3]. В работе [4] исследованы модифицированные спиральные структуры, темные моды которых возбуждаются С-резонатором. Было показано, что предлагаемый двумерный спиральный метаматериал обладает высокой чувствительностью, сравнимой с сенсорами оптического диапазона частот.

В данной работе продолжается исследование спиральных 2D метаматериалов для сенсорных приложений. Используя алюминиевые спиральные диски, нанесенные на 15 мкм полипропиленовую пленку, с такими же параметрами как в статье [4] были проведены измерения фазовых спектров с помощью квазиоптического спектрометра на лампе обратной волны. Фазовые спектры обладают более узкими провалами, что позволило улучшить такой параметр сенсора как добротность (FOM). Например, для симметричной спиральной структуры с С-резонатором с внешним радиусом  $R = 192$  мкм, внутренним радиусом  $r = 18$  мкм, периодом  $p = 786$  мкм, шириной плеча  $w = 8$  мкм и количеством плеч  $n = 12$  удалось увеличить максимальный FOM с  $1662 \text{ (RUI мм)}^{-1}$  при измерении амплитудного частотного спектра до  $4908 \text{ (RUI мм)}^{-1}$  при измерении фазовых спектров (рис. 1), т.е. примерно в три раза. Подробные экспериментальные и численные результаты работы будут представлены на конференции.



**Рис. 1.** Пример фазовых спектров (графики слева) для спирального метаматериала и их производные (справа). Параметры структуры см. в тексте.

### **Благодарность**

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Новосибирский ЛСЭ" в ИЯФ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании.

### **Список источников**

- [1] **Pors A. et al.** Localized Spoof Plasmons Arise while Texturing Closed Surfaces // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108, № 22. P. 223905.
- [2] **Huidobro P.A. et al.** Magnetic Localized Surface Plasmons // Phys. Rev. X. 2014. Vol. 4, № 2. P. 021003.
- [3] **Zhou J. et al.** Terahertz on-chip sensing by exciting higher radial order spoof localized surface plasmons // Appl. Phys. Express. 2020. Vol. 13, № 1. P. 012014.
- [4] **Gerasimov V.V. et al.** Exploiting Localized Surface Plasmon Resonances in Subwavelength Spi-ral Disks for THz Thin Film Sensing // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, № 10. P. 3595.

## **Studying phase spectra of spoof localized plasmon resonances excited on spiral 2D metamaterials with thin dielectric coatings in the terahertz frequency range**

*O. E. Kameshkov<sup>1,2</sup>, V. V. Gerasimov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Terahertz plasmonic sensors are considered a promising technology in the field of biomedicine due to their real-time, label-free, and ultrasensitive monitoring features. Their widespread use is still limited to low-loss materials, single amplitude characterization method, and low sensor sensitivity. In this paper, we study sensors based on spiral metamaterials, which enable to excite spoof localized plasmon resonances (LPR) in the terahertz frequency range, similar in properties to classical LPR. It was shown numerically and experimentally that the use of the frequency phase spectrum instead of the amplitude one makes it possible to increase the figure of merit of this type of sensor when measuring the refractive index of thin dielectric coatings.

*Keywords:* Terahertz sensors, Spiral metamaterials, Phase spectrum, Spoof localized plasmon resonance.

# Оптические методы и исследование субклеточной структуры функционирующей клетки

*Г. В. Максимов*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия;

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Представлен анализ результатов исследований трехмерной структуры функционирующих клеток с помощью методов оптической томографии, атомно-силовой микроскопии, лазерной интерференционной (ЛИМ), сканирующей ион-проводящей микроскопии (Scanning Ion-Conductance Microscopy – SICM) и Раман - микроскопии. Отмечается, что без использования специфических маркеров, данный комплекс методов позволят контролировать динамику внутриклеточных процессов, связанных с перераспределением внутриклеточных везикул, изменением структуры цитоскелета и морфологии клетки.

*Ключевые слова:* Оптические методы, Клетка, Структура.

*Цитирование:* Максимов, Г. В. Оптические методы и исследование субклеточной структуры функционирующей клетки / Г. В. Максимов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 391–392.

Активация специфических рецепторов при генерации и проведении возбуждения в нервной клетке инициирует цепь биофизических процессов, вызывающих как изменение трансмембранного потенциала, перераспределение ионов, так и перестройку цитоскелета, экзоцитоз везикул, а также к объема клетки и синтез АТФ в митохондриях. В данной работе, с помощью сканирующей ион-проводящей микроскопии, атомно-силовой микроскопии, лазерной интерференционной микроскопии, стационарной флуориметрии и спектроскопии комбинационного рассеяния исследовали изменение топографии поверхности клеток и жесткости структур цитоплазмы нейронов в норме и при возбуждении нервной клетки.

Установлено, что при активации рецепторов ацетилхолина (АХР) в нейронах наблюдаются изменения десорбции мембраносвязанного  $\text{Ca}^{2+}$ , жесткости цитоплазмы клетки (модуль Юнга) и амплитуды оптической разности хода структур цитоплазмы клеток (ОРХ). Предположено, что увеличение ОРХ в примембранной области (мембранный и примыкающий к мембране слои цитоплазмы) при активации АХР, связано с вектором распределения везикул в цитоплазме нейронов. Доказано, что изменение жесткости структур цитоплазмы при активации АХР обусловлены изменениями распределения и конформации белков цитоскелета, участвующих в цитоплазматическом транспорте и высвобождении везикул. Выявленные эффекты могут быть связаны с экзоцитозом везикул из нейрона за счет десорбции мембраносвязанного  $\text{Ca}^{2+}$  и увеличения концентрации внутриклеточного  $\text{Ca}^{2+}$ . Вероятно, экзоцитоз серотонинсодержащих везикул (ССВ) осуществляется не равномерно, а на поверхности нейролеммы существуют сайты для формирования кластеров ССВ везикул в местах с различным локальным поверхностным зарядом. Активация АХР вызывает вход  $\text{Ca}^{2+}$



через каналы L-типа и/или десорбцию мембраносвязанного  $\text{Ca}^{2+}$ , что последовательно стимулирует изменению вязкости плазматической мембраны нейрона и экзоцитоз везикул, а также активирует выход  $\text{Ca}^{2+}$  из эндоплазматического ретикулума. Вероятно, увеличение внутриклеточного  $\text{Ca}^{2+}$ , контролируя синтез АТФ в митохондриях, активирует подвижность молекул кинезина, и кластеры ССВ транспортируются ближе к цитоплазматической поверхности нейролеммы. Таким образом, кластеры периферических ССВ и митохондрии получают больше  $\text{Ca}^{2+}$  и АТФ, чем в центре клетки. Предположено, что слияние ССВ с нейролеммой способствует выходу серотонина и активации серотониновых рецепторов, локализованных на экстраклеточной поверхности мембраны, что повышает вклад фосфолипазы С в образовании инозитолтрифосфата, стимулирует выход  $\text{Ca}^{2+}$  из эндоплазматического ретикулума, усиливая экзоцитоз ССВ.

### **Благодарность**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-79-30062), а также Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Молекулярные технологии живых систем и синтетическая биология».

## **Optical methods and study of the subcellular structure of a functioning cell**

*G. V. Maksimov*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

National Research Technological University «MISIS», Moscow, Russia

An analysis of the results of studies of the three-dimensional structure of functioning cells using the methods of optical tomography, atomic force microscopy, scanning ion-conductance microscopy, laser interference and Raman microscopy is presented. It is noted that without the use of specific markers, this set of methods will make it possible to control the dynamics of intracellular processes associated with the redistribution of intracellular vesicles, changes in the structure of the cytoskeleton and cell morphology.

*Keywords:* Optical methods, Cell, Structure.

# Численная обработка изображений, получаемых с помощью голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры

А. В. Черных, А. С. Езерский, К. А. Герасимов, А. А. Мисюра, Н. В. Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

С помощью численной обработки изображений, получаемых в системе цифрового голографического микроскопа, в качестве окуляра которого используется линза с эффектом геометрической фазы, решается задача получения фазовых изображений объекта. Доступ к амплитудно-фазовым характеристикам осуществляется с помощью метода параллельного фазового сдвига, в соответствии с которым происходит запись набора цифровых голограмм специализированной поляризационной камерой. Использование линзы с эффектом геометрической фазы позволяет реализовать схему интерферометра общего пути, в которой интерferируют пучки с правой и левой круговыми поляризациями. Благодаря использованию поляризационной камеры, обеспечивается одновременная регистрация распределений интенсивности в четырех проекциях векторов круговой поляризации. Рассматриваемая конфигурация микроскопа предполагает дополнительную компьютерную постобработку. В работе обсуждаются способы получения и численной обработки фазовых изображений микроскопических объектов. Рассмотрены методы коррекции искажений в получаемом фазовом распределении, которые обусловлены кривизной волнового фронта волны, выступающей в качестве опорной, шумами и интерференцией в плоскости регистрации волн паразитных вторичных дифракционных порядков, сформированных бинарной структурой геометрической фазовой линзы.

*Ключевые слова:* Цифровая голография, линза с эффектом геометрической фазы, метод фазового сдвига, цифровой голографический микроскоп, интерферометр общего пути.

*Цитирование:* Черных, А. В. Численная обработка изображений, получаемых с помощью голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры / А. В. Черных, А. С. Езерский, К. А. Герасимов, А. А. Мисюра, Н. В. Петров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 393–396.

## Введение

Известно, что среди методов анализа и наблюдения состояния трехмерных объектов, в которых допускается только неинвазивная диагностика, одним из самых лучших является количественная фазовая визуализация. Однако, их слабыми сторонами являются: высокая чувствительность к внешним воздействиям и когерентный шум.

В работе обсуждаются физические принципы голографического микроскопа с геометрической фазовой линзой, анализируется поведение волнового фронта (ВФ) после прохождения через линзу. Показано, что геометрическая фазовая линза приводит к формированию сдвиговой интерференционной картины, вызывая перекрытие порядков

дифракции в получаемом изображении. Предлагаются решения вышеобозначенных проблем количественной фазовой визуализации.

### 1. Регистрация интерференционного поля методом фазовых шагов

В работе рассматривается голографический микроскоп, работающий на основе поляризационной камеры и геометрической фазовой линзы.

Лазерное излучение проходит через призму Глана, затем попадает на образец и направляется на объектив микроскопа, за которым формируется первое изображение. После, пучок проходит через геометрическую фазовую линзу (ГФЛ) и, согласно работе [1], ГФЛ формирует два когерентных пучка: левостороннее и правостороннее циркулярно поляризованные. Один пучок передает изображение на плоскость камеры с массивом микрополяризаторов, а второй выступает в роли опорной волны.

Четыре результирующих распределения интенсивности с соответствующими фазовыми сдвигами одновременно регистрируются в соседних пикселях поляризационного датчика:

$$I_x = |u_+ \cdot \exp(-ix) + u_- \cdot \exp(ix)|^2, \quad (1)$$

где  $x$  принимает значения:  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$

Используя алгоритм цифровой фазосдвигающей голографии [3], из системы уравнений (1) мы можем получить комплекснозначное поле интерферирующих волн  $u_+$  и  $u_-$ :

$$\Delta u = \frac{1}{4} \left( (I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}) - i(I_0 - I_\pi) \right), \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = \text{angle}(\Delta u). \quad (3)$$

Значение  $\Delta \varphi$  определяет разницу между фазами  $\varphi_+$  и  $\varphi_-$  из различных  $u_+$  и  $u_-$  ВФ, содержащих свою кривизну. Для ее компенсации необходимо произвести дополнительную обработку, в данной модели считаем, что в расходящемся пучке дифракционное размытие возмущения от объекта не вносит значительного вклада в интерференционную картину. В следующих разделах мы рассмотрим два возможных метода восстановления фазового сдвига.

### 2. Корректировка фазы методом вычитания вычисленной кривизны ВФ

Данный метод коррекции основан на предположении, что фронты фоновых волн эквивалентны параболическим фронтам, на один из которых накладывается фазовое распределение исследуемого объекта. Если исследуемый образец вносит сдвиг фазы, не превышающей  $2\pi$ , то можно выполнить фазовую коррекцию, устранив различия в кривизне фоновых ВФ, путем вычитания разности их параболических составляющих (Рис. 1а). В данном измерении индекс структурного сходства (SSIM) составил 0,26281, а пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR) – 6,4848.

### 3. Корректировка фазы объекта методом вычитания измеренной кривизны ВФ

Альтернативный вариант устранения искривления ВФ включает запись дополнительной цифровой голограммы  $H_{bg}$  для поля, невозмущенного объектом. В этом случае мы можем получить разности фаз для фоновых ВФ, после вычитания их из разности фаз для поля с объектом остается распределение фазового сдвига от образца (Рис. 1.б). Для этого метода сходство распределения фазы SSIM равно 0,24872, PSNR – 7,3247.

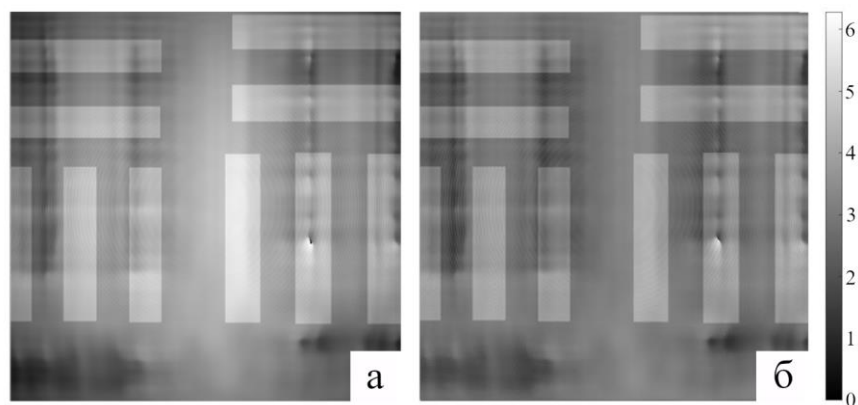


Рис. 1. Восстановленная фаза объекта методами вычитания вычисленной (а) и измеренной (б) кривизны ВФ

### 4. Экспериментальная проверка результатов

Для извлечения фазового набег от объекта были предложены два подхода: коррекция с вычитанием вычисленной и измеренной кривизны ВФ. При экспериментальной апробации восстановленные распределения фаз не имеют высокой степени контрастности и сильно искажены. Основная причина искажений кроется в образовании вторичных дифракционных порядков от ГФЛ [4].

### Заключение

Рассмотренные методы восстановления распределений фазового сдвига дают схожие результаты по SSIM и PSNR. В экспериментальной реализации метод коррекции с вычитанием измеренной кривизны ВФ позволяет восстанавливать распределение фазового сдвига с меньшими искажениями, поскольку частично подавляет радиальные осцилляции фазового сдвига от вторичных дифракционных порядков.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № MD-6101.2021.1.2. This work was supported by President of Russian Federation Grant No. MD-6101.2021.1.2.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang J.** Self-Interference Cancellation: A Comprehensive Review from Circuits and Fields Perspectives / J. Zhang, F. He, W. Li, Y. Li, Q. Wang, S. Ge, J. Xing, H. Liu, Y. Li, J. Meng // *Electronics*. — 2022. — Vol 11. — № 172. — P. 1–16.
- [2] **Awatsuji, Y.** Parallel quasi-phase-shifting digital holography/ Y. Awatsuji, M. Sasada, T. Kubota// *Applied Physics Letters*. — 2004. — Vol 85. — № 6. — P. 1069–1071.
- [3] **Yamaguchi, I.** Phase-shifting digital holography / I. Yamaguchi, T. Zhang // *Optics Letters*. — 1997. — Vol 22. — № 16. — P. 1268–1270.
- [4] **Chernykh, A.** Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens/ A. Chernykh, A. Ezerskii, A. Georgieva, N. Petrov // *Proceedings of SPIE*. — 2021. — Vol. 11898. — P. 118980X.

## Numerical processing of images obtained with the holographic registration system based on the geometric phase effect and the polarization camera

*A. V. Chernykh, A. S. Ezerskii, K. A. Gerasimov, A. A. Misura, N. V. Petrov*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

### Annotation

The problem of obtaining phase distribution by the numerical postprocessing of images obtained in the digital holographic microscope with the geometric phase lens is discussed. Amplitude and phase characteristics are accessed by means of the parallel phase shift digital holography, in accordance with which the set of digital holograms is recorded by a specialized polarization camera. The use of the geometric phase lens makes it possible to implement a common path interferometer scheme, in which beams with right and left circular polarization interfere. By using the polarization camera, simultaneous recording of intensity distributions in four projections of circular polarization states is possible. The considered microscope configuration implies additional post-processing. Methods to correct distortions in the resulting phase distribution caused by the wavefront curvature of the wave, acting as a reference, noise and interference in the registration plane of the parasitic secondary diffraction orders formed by the binary structure of the geometrical phase lens, are considered.

*Keywords:* Digital holography, Geometric phase lens, Phase shifting digital holography, Digital holographic microscope.

# Многоволновая цифровая голография на основе мультимастотной акустооптической фильтрации излучения

*О. В. Польщикова, А. В. Горевой, А. С. Мачихин*

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,  
Москва, Россия

Рассмотрено применение многочастотной акустооптической (АО) фильтрации излучения в установке для внеосевой многоволновой цифровой голографии на основе интерферометра Маха-Цендера. Проведен теоретический и экспериментальный анализ факторов, в том числе определяемых геометрией АО взаимодействия, влияющих на качество многоволновых цифровых голограмм (МЦГ), при различном числе спектральных каналов (от 1 до 4). Показано, что при определенных параметрах схемы пространственное разрешение и другие характеристики восстановленных из МЦГ карт фазовой задержки или толщины сопоставимы с характеристиками в одноволновом (последовательном) режиме. Одновременная регистрация нескольких спектральных каналов в виде мультиплексированной цифровой голограммы может быть перспективна для изучения быстропротекающих процессов и подвижных объектов в широком спектральном диапазоне.

*Ключевые слова:* Многоволновая цифровая голография, Акустооптический перестраиваемый фильтр, Количественная фазовая микроскопия.

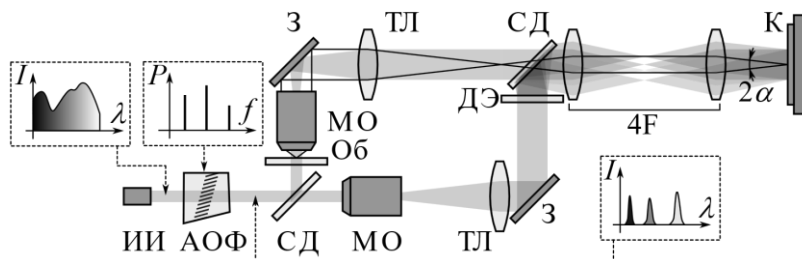
*Цитирование:* Польщикова, О. В. Многоволновая цифровая голография на основе мультимастотной акустооптической фильтрации излучения / О. В. Польщикова, А. В. Горевой, А. С. Мачихин // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 397–400.

## Введение

Многоволновая цифровая голография получила широкое применение в биомедицине и технике для решения различных задач [1]. Один из способов ее технической реализации основан на применении перестраиваемого акустооптического фильтра (АОФ) [2]. Перспективным является использование АОФ в многочастотном режиме фильтрации широкополосного излучения и одновременная регистрация нескольких интерференционных картин на разных длинах волн в виде мультиплексированной цифровой голограммы. Исследованию возможностей и ограничений такого метода посвящена данная работа.

### 1. Экспериментальная установка и теоретическое исследование

В исследовании использовалась установка для внеосевой многоволновой цифровой голографии (рис. 1), состоящая из широкополосного источника излучения ИИ, АОФ, выделяющего от одного до четырех узких спектральных интервалов, интерферометра Маха-Цендера, 4f-системы и видеокамеры К. Дополнительно в схему может быть введен спектральный элемент (призма или дифракционная решетка), вносящий в пучок угловую дисперсию, благодаря чему меняется зависимость положения  $\pm 1$ -х порядков в области пространственных частот (ОПЧ) от длины волны.



ИИ — источник излучения, АОФ — акустооптический фильтр, СД — светоделители, Об — объект, МО — микрообъективы, ТЛ — тубусные линзы, З — зеркала, ДЭ — дополнительный элемент с угловой дисперсией,  $4F$  —  $4f$ -система, К — камера,  $\alpha$  — апертурный угол. На вставках показаны спектры излучения до и после АОФ, а также спектр мощности управляющего сигнала АОФ

Рис. 1. Схема установки для многоволновой цифровой голографии

В результате математического моделирования была установлена взаимосвязь параметров данной установки и АОФ. Произведена количественная оценка влияния геометрии акустооптического (АО) взаимодействия и числа спектральных каналов в многоволновой цифровой голограмме на качество восстанавливаемых из нее фазовых карт. Основными характеристиками качества являются размер линейного поля зрения, которое определяется видностью интерференционной картины, и пространственное разрешение, которое ограничено числовой апертурой микрообъектива и размером фильтра в ОПЧ при цифровой обработке. Их соотношение также зависит от когерентности излучения, угла между интерферирующими пучками и свойств элемента с угловой дисперсией при его наличии в схеме.

## 2. Результаты экспериментов

Для экспериментального подтверждения выводов теоретического исследования были выполнены измерения тест-объектов в виде вытравленных в слое фоторезиста штриховых мир и других картин и сравнение результатов с данными измерений на аттестованном оборудовании.

На рис. 2а показана зарегистрированная четырехволновая цифровая голограмма мира и ее увеличенный фрагмент, рис. 2б демонстрирует частотный спектр этой голограммы с областями фильтрации для четырех длин волн, а соответствующие им восстановленные фазовые карты представлены на рис. 2в.

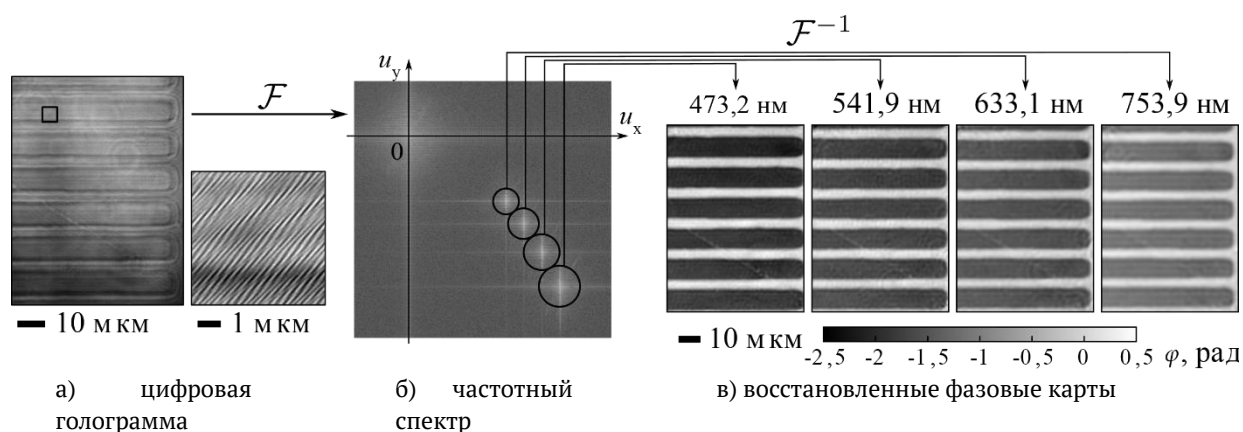


Рис. 2. Цифровая обработка четырехволновой голограммы

В результате экспериментов подтверждено, что в системах многоволновой цифровой голографии с использованием АОФ есть возможность изменения размера полезного поля зрения за счет оптимального выбора геометрии АО взаимодействия. Показано, что пространственное разрешение восстановленных фазовых карт падает по мере увеличения числа одновременно регистрируемых спектральных каналов и может быть увеличено в схеме с использованием дополнительного спектрального элемента.

### Заключение

Использование АОФ в многоволновой цифровой голографии обеспечивает возможность задания числа, расположения и ширины спектральных каналов, благодаря чему можно адаптировать ОС под конкретные задачи и управлять характеристиками качества восстанавливаемых амплитудных и фазовых карт, добиваясь результата, сопоставимого с одноволновым (последовательным) режимом.

### Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-58-18007). Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

### Список источников

- [1] **Turko, N. A.** Simultaneous three-wavelength unwrapping using external digital holographic multiplexing module / N. A. Turko, P. J. Eravuchira, I. Barnea, N. T. Shaked // Optics Letters. — 2018. — Vol. 43. — № 9. — P. 1943–1946.
- [2] **Polschikova, O.** Single-shot multiwavelength digital holography using Bragg diffraction of light by several ultrasound waves [Invited] / O. Polschikova, A. Machikhin, A. Gorevoy, E. Stoykova // Journal of the Optical Society of America A. — 2022. — Vol. 39. — № 2. — P. A79-A85.



# Multi-wavelength digital holography based on multi-frequency acousto-optic filtration of light

*O. V. Polschikova, A. V. Gorevoy, A. S. Machikhin*

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

The application of multi-frequency acousto-optic (AO) filtration of light in an off-axis multi-wavelength digital holography setup based on a Mach-Zehnder interferometer is considered. Theoretical and experimental analysis of factors, including those determined by the geometry of AO interaction, affecting the quality of multi-wavelength digital holograms (MDH) is carried out for a different number of spectral channels (from 1 to 4). It is shown that for certain parameters of the scheme, the spatial resolution and other characteristics of the phase delay or thickness maps reconstructed from the MDH are comparable with the characteristics in the single-wavelength (sequential) mode. Simultaneous registration of several spectral channels in the form of a multiplexed digital hologram can be promising for studying fast processes and moving objects in a wide spectral range.

*Keywords:* Multi-wavelength digital holography, Acousto-optic tunable filter, Quantitative phase imaging.

# Конфокальная голографическая сканирующая микроскопия

*Ю. Н. Захаров*

Гарвардский университет, Бостон, США

В докладе представлены принципы и схемы сканирующей лазерной голографии и их воплощение в цифровой голографической микроскопии, отмечены особенности восстановления голограмм, записанных в сканирующем режиме, вызванные спецификой сканирования.

*Ключевые слова:* Фазовая визуализация, Цифровая голографическая микроскопия, Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия.

*Цитирование:* **Захаров, Ю. Н.** Конфокальная голографическая сканирующая микроскопия / Ю. Н. Захаров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 401–403.

В современных научных исследованиях прочное место заняла как лазерная сканирующая микроскопия, представленная ведущими мировыми производителями микроскопов, так и цифровая голографическая микроскопия, хотя и имеющая коммерческие предложения, в основном опирающаяся на собственные разработки исследователей. Одна из интересных техник, обладающих большим потенциалом в 3D микроскопии — это оптическая сканирующая голография (ОСГ) [1, 2]: вместо того, чтобы фиксировать интерференцию опорной и предметной волн, в ОСГ облучают объект интерференционным полем, созданным путем совмещения двух когерентных пучков, а затем сканируют объект этим суммарным пучком, фиксируя пропущенный или отражённый свет точечным детектором с последующим восстановлением такой голограммы дискретным преобразованием Фурье.

Другой подход основан на применении лазерного сканирующего микроскопа (ЛСМ) и построении голографической схемы на его основе. Он сочетает принципы ЛСМ и цифровой голографии. В процессе поточечного или линейного сканирования регистрируется результат интерференции опорного и предметного лучей, который сохраняется в виде двумерного массива данных, представляющего цифровую голограмму. Процесс реконструкции записанных голограмм сводится к программной обработке таких массивов данных.

Уже 25 лет назад был описан [3] и впоследствии запатентован [4] довольно сложный по конструкции конфокальный сканирующий лазерный голографический микроскоп. В последнее десятилетие были также предложены другие схемы:

цифровой конфокальный микроскоп [5], схема которого содержит двойной интерферометр настроенный на пропускание или отражение света с пошаговой записью цифровой голограммы, обработка основана на быстром преобразовании Фурье и фильтрации с помощью виртуальной диафрагмы с динамически меняющимся фокусом;

синтетическая оптическая голография [6], которая реализуется на базе конфокального микроскопа путем добавления светоделителя и линейно движущегося зеркала,

генерирующего синтетическую эталонную волну, аналогичную наклонной плоской волне в широкоугольной внеосевой голографии;

количественная фазово-контрастная конфокальная микроскопия [7], в которой образец находится на движущемся столике, а освещение происходит коллимированной линией, опорная волна, направленная на камеру под небольшим углом формирует внеосевую голограмму; вариант этой схемы [8] содержит гальваническое зеркало.

Все вышеописанные схемы, кроме последней, используют для сканирования подвижный предметный столик, что делает процесс сканирования чрезвычайно медленным.

Первое воплощение голографической сканирующей микроскопии на базе коммерческого конфокального лазерного сканирующего микроскопа было нами представлено в 2010 году [9] и получило дальнейшее развитие [10]. Предложенная нами схема реализована путем добавления в микроскоп LSM-510 DuoScan (Carl Zeiss) всего лишь одного зеркала, формирующего опорную волну. Однако такое простое техническое решение обернулось необходимостью разработки специальных алгоритмов восстановления голограмм.

Конфокальная голографическая сканирующая микроскопия открывает новые возможности изучения объектов, в том числе биологических образцов, выделяя фазовый набег в тонком слое.

### **Благодарность**

Автор благодарен специалистам, чьи работы из открытой печати, использованы для доклада.

### **Список источников**

- [1] **Lam, E.Y.** Three-dimensional microscopy and sectional image reconstruction using optical scanning holography / Lam E.Y. et.al. // Applied Optics - 2009. - V. 48. - N 34. - P. H113–H119.
- [2] **Tsai, C.-M.** Optical scanning holography with a polarization directed lens - Tsai C.-M. et al. // Applied Optics. - 2021. - V. 60. - N 10. - P. B113–B118.
- [3] **Herring, R.A.** Confocal scanning laser holography, and an associated microscope: a proposal // Optik. - 1997. - V. 105, - P. 65–68.
- [4] **US Patent 7639365 B2.** Confocal scanning holography microscope / Herring R.A. - 2009..
- [5] **Goy, A.S.** Digital confocal microscope / Goy, A.S., Psaltis, D. // Optics Express. - 2012. - V. 20. - P. 22720 - 22727.
- [6] **Schnell, M.** Synthetic optical holography for rapid nanoimaging / Schnell, M., Carney, P.S. Hillenbrand, R. // Nature Communications. - 2014. - V. 5(1). - P. 3499-3508.
- [7] **Liu, C.** Quantitative phase-contrast confocal microscope / Liu, C., Marchesini, S. and Kim, M.K. // Optics Express. - 2012. - V. 22. - P. 17830-17839.
- [8] **Liu, C.** High-speed line-field confocal holographic microscope for quantitative phase imaging / Liu C. et al. // Optics Express. - 2016 - V. 24. - N. 9. - P. 9251–9265.
- [9] **Zakharov, Yu.N.** Holographic technique for 3d optical microscopy / Yu.N. Zakharov and V.V. Lobynitseva. // Speckle2010: speckle fields forever. Technical Program. Abstracts selection. - Florianopolis – SC – Brazil. - 2010.

- [10] **Zakharov, Yu.** Holographic scanning microscopy - novel approach to digital holography and laser scanning microscopy. / Zakharov, Yu. et al. // OSA Technical Digest. Imaging and Applied Optics-2014. - Paper DW5B.1.

## **Confocal holographic scanning microscopy**

*I. N. Zakharov*

Harvard University, Boston, USA

This report includes principles and schematics of scanning laser holography and their implementation in digital holographic microscopy, it is noted features of scanning mode recorded hologram reconstruction, caused by scanning specific.

*Keywords:* Quantitative phase imaging, digital holographic microscopy, confocal laser scanning microscopy.

# Анализ реакции клеток *in vitro* на фотодинамическое воздействие с использованием методов цифровой голографической микроскопии и томографии

*И. В. Семенова, А. В. Белашов, А. А. Жихорева, О. С. Васютинский*

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен новый подход к анализу реакции клеток на фотодинамическое воздействие на основе голографических методов. Он позволяет проводить неинвазивный мониторинг клеточных культур в течение длительного времени и предоставляет количественные данные об основных морфологических параметрах клеток и динамике их изменения. Полученные данные позволяют идентифицировать преобладающие механизмы гибели клеток при разных дозах воздействия. Эксперименты проводились как на постоянных клеточных линиях, так и на линиях, полученных из опухолевого материала пациентов с разными злокачественными новообразованиями. Разработанный подход может быть использован в дальнейшем для оценки эффективности разных видов терапии онкологических заболеваний, в том числе для персонализированной терапии.

*Ключевые слова:* Голографическая микроскопия, томография, фотодинамическое воздействие, клеточная морфология.

*Цитирование:* Семенова, И. В. Анализ реакции клеток *in vitro* на фотодинамическое воздействие с использованием методов цифровой голографической микроскопии и томографии / И. В. Семенова, А. В. Белашов, А. А. Жихорева, О. С. Васютинский // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 404–409.

## Введение

Фотодинамическая терапия все чаще применяется в качестве как самостоятельного, так и вспомогательного метода лечения различных злокачественных новообразований. Противоопухолевый эффект фотодинамической терапии обеспечивается тремя взаимосвязанными процессами: непосредственной гибелью опухолевых клеток, повреждением сосудов, питающих опухолевую ткань, и активацией иммунного ответа. Хотя общий вклад этих процессов в исход лечения хорошо известен, фотодинамическое воздействие на клеточном уровне еще недостаточно изучено.

При исследовании эффективности терапевтического воздействия на клеточном уровне важно не только выяснить, приводит ли это воздействие к гибели клеток или нет, но и идентифицировать механизмы гибели клеток при разных дозах воздействия и, таким образом, определить дозы, необходимые для запуска того или иного механизма. Наиболее часто используемый метод определения механизмов гибели клеток основан на применении различных флуоресцентных красителей с наблюдением их флуоресценции в конфокальном микроскопе. Также используется анализ морфологических изменений в клетках с помощью проточной цитофлуориметрии, оптической или электронной микроскопии. В работах [1-5]

мы показали преимущества методов цифровой голографической микроскопии для оценки морфологических изменений клеток при терапевтическом воздействии. Существенными преимуществами голографических методов в биологических исследованиях являются (1) практически полная неинвазивность, т.к. для регистрации голограмм используется излучение малой плотности мощности порядка мкВт/см<sup>2</sup>; (2) возможность получения количественной информации о широком наборе морфологических и оптических параметров клеток, (3) возможность наблюдения изменений этих параметров в динамике в течение длительного времени и (4) возможность автоматического определения данных о больших ансамблях клеток в образце. В частности, методами цифровой голографической микроскопии и томографии можно определять форму клеток, их толщину, объем, сухую массу, площадь проекции, площадь поверхности мембраны, трехмерное распределение показателя преломления и его градиента. Важным преимуществом этих методов является также работа с образцами без использования дополнительных химических реагентов. Мониторинг одних и тех же клеток, обеспечиваемый точным сканированием образцов, позволяет анализировать динамику изменений как в отдельных клетках, так и во всей популяции, что позволяет проводить статистический анализ полученных данных.

В докладе представлен обзор наших недавних исследований реакции *in vitro* клеток трех постоянных клеточных линий разной онкогенности (раковых клеток HeLa и A549 и псевдонормальных клеток 3T3), а также клеток, полученных из опухолевого материала пациентов с солидными опухолями разной локализации, на фотодинамическое воздействие (ФДВ) с использованием фотосенсибилизатора (ФС) Радахлорин, используемого в клинической практике. Работы выполнялись в сотрудничестве и на образцах клеточных культур, предоставленных коллегами из Института Цитологии РАН и Института Онкологии им. Н.Н. Петрова. Исследования проводились методами цифровой голографической микроскопии (ДНМ) с помощью лабораторной установки и цифровой голографической томографии (ДНТ) с использованием микроскопа 3D Cell Explorer (Nanolive).

### 1. Методика исследования

В чашки Петри с образцами культур клеток добавляли раствор ФС Радахлорин в культуральной среде в концентрации 5 мкг/мл. Клетки инкубировали в этом растворе в течение 4 часов, затем среду заменяли на чистую, без ФС. Нами было показано [5], что Радахлорин проникает в клетки и накапливается преимущественно в лизосомах. Образцы культур фотосенсибилизированных клеток облучали диодным лазером с длиной волны 660 нм, близкой к максимуму полосы поглощения ФС. Плотность лазерного луча варьировалась в пределах 6-130 мВт/см<sup>2</sup>. Регистрация голограмм с помощью ДНМ проводилась HeNe лазером с плотностью мощности излучения около 50 мкВт/см<sup>2</sup>. Для регистрации с помощью ДНТ использовался лазер на длине волны 532 нм.

Для получения большой выборки данных, необходимой для корректного статистического анализа, проводились сканирование и регистрация более 200

интерференционных картин по всей площади образца. Фазовые изображения восстанавливались с помощью стандартного алгоритма с использованием метода наименьших квадратов. Для обеспечения возможности анализа большого количества клеток в образцах нами были разработаны и апробированы алгоритмы автоматической сегментации клеток на фазовых изображениях и машинного обучения для распознавания клеток в разных состояниях [3,4].

Хотя голографические методы позволяют определять достаточно большой набор параметров клеток [6], в большинстве случаев анализ реакции клеток на ФДВ проводился нами на основе исследования изменений среднего фазового набега или сухой массы клеток. Эти параметры оказались наиболее информативными.

## 2. Полученные результаты

В таблице 1 приведены данные по морфологическим параметрам клеток трех постоянных клеточных линий (HeLa, A549 и 3T3), полученные с помощью ДНТ.

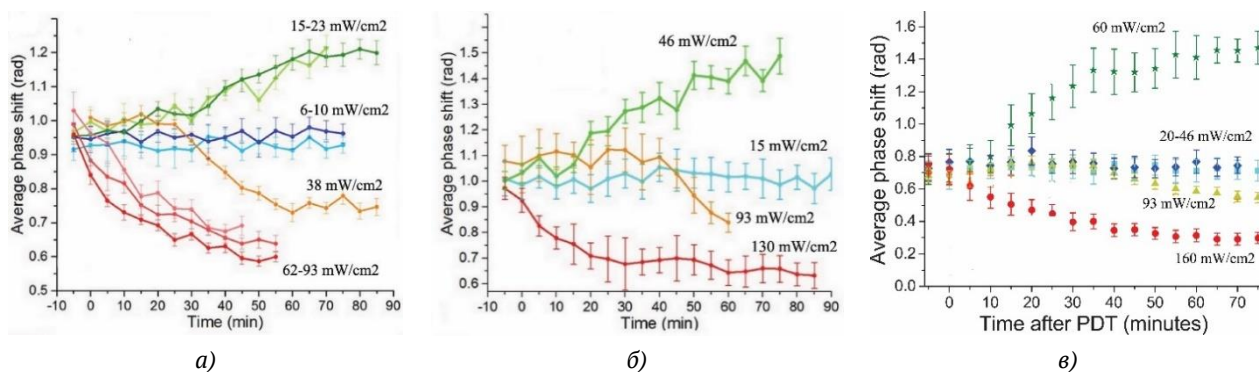
**Таблица 1.** Объем (V), площадь проекции ( $S_{proj}$ ) и сухая масса (DM) клеток трех линий

Клеточная линия	V ( $\mu\text{m}^3$ )	$S_{proj}$ ( $\mu\text{m}^2$ )	DM (pg)
HeLa	3470±1480	530±190	230±80
A549	4780±1310	650±210	330±130
3T3	7160±2300	840±320	390±140

На рис. 1 приведены графики, представляющие динамики изменения среднего фазового набега в клетках трех исследуемых линий после облучения с разными дозами (разной плотностью мощности в течение одинакового времени). Как видно из полученных зависимостей, при малых дозах облучения фазовый набег клеток не изменяется, клетки выживают. При увеличении дозы наблюдается постепенный рост среднего фазового набега с выходом на плато, при этом отсутствуют статистически значимые изменения сухой массы клеток; происходят изменения, характерные для гибели клеток путем апоптоза - округление и дегидратация клеток при сохранении целостности их мембран. При высоких дозах облучения возникают изменения, характерные для гибели путем некроза – клеточная мембрана разрушается, внутриклеточная среда вытекает в межклеточное пространство, что сопровождается уменьшением как среднего фазового набега, так и сухой массы. При этом скорость протекания некроза зависит от дозы облучения – чем выше доза, тем быстрее происходит некроз. Сделанные предположения по преобладающим механизмам гибели клеток были подтверждены стандартными биологическими тестами с соответствующими флуоресцентными красителями [1].

Анализ полученных зависимостей показал, что для клеток всех трех исследуемых линий последовательность смены механизмов гибели клеток с увеличением дозы облучения - апоптоз, вторичный некроз, некроз - остается постоянной. Однако для клеток разных линий эти механизмы реализуются при существенно разных дозах. Как видно из рис. 1, клетки

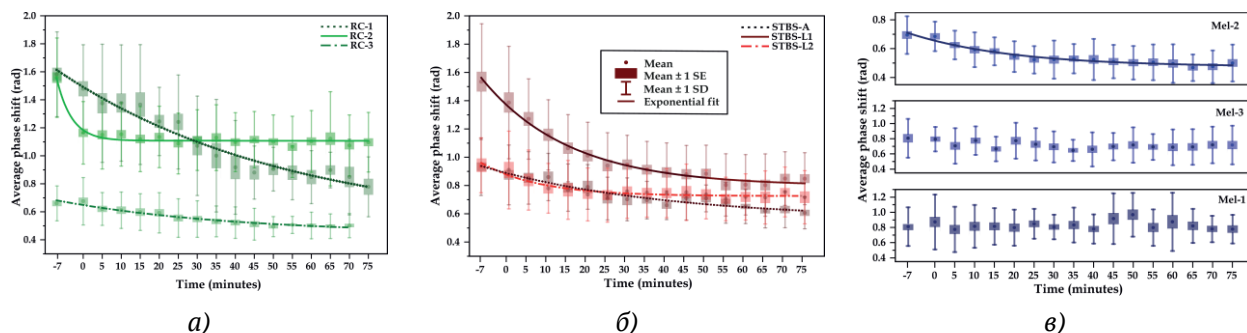
линии HeLa оказываются значительно более чувствительными к фотодинамическому воздействию, чем клетки A549 и 3T3.



**Рис. 1.** Динамики изменения среднего фазового набега в культурах клеток HeLa (а), А549 (б) и 3Т3 (в) после ФДВ с разными дозами облучения

Анализ реакции на ФДВ культур клеточных линий, полученных из опухолевого материала пациентов, проводился на образцах меланомы, сарком мягких тканей, остеосарком и клеток рака почки. Использовалась высокая доза облучения, предполагающая гибель клеток по механизму некроза. Было показано, что клетки разных солидных опухолей демонстрируют существенно разную реакцию на ФДВ при одних и тех же дозах облучения. В частности, клетки меланомы показали гораздо более высокую устойчивость к ФДВ по сравнению с клетками сарком и, в особенности, клетками рака почки. В частности, из трех культур клеток меланомы только одна оказалась чувствительной к воздействию, а две другие оставались резистивными даже при высокой дозе облучения. Среди шести образцов сарком резистивной оказалась одна, а все три образца рака почки продемонстрировали хорошую чувствительность к ФДВ. При этом необходимо отметить, что клетки одной и той же локализации опухоли, но взятые у разных пациентов, также по-разному реагировали на воздействие с одинаковыми дозами.

На рис. 2 приведены полученные динамики изменения среднего фазового набега в клетках пациентов: рака почки (а), сарком (б) и меланом (в). Видны существенные различия как в исходных параметрах клеток разных пациентов с одинаковой локализацией и типом опухоли, так и в динамике изменения фазового набега в ходе гибели клеток.





**Рис. 2.** Динамики изменения среднего фазового набега после ФДВ в культурах клеток опухолей пациентов: а) рака почки, б) сарком, в) меланом

### **Заключение**

Таким образом, мы показали, что динамика изменения среднего фазового набега и сухой массы клеток может быть использована для определения механизма гибели клеток *in vitro* при внешнем воздействии и для оценки скорости их гибели. Голографические методы позволяют проводить мониторинг изменений клеточных параметров в течение длительного времени практически неинвазивно. Автоматическое сканирование образцов и использование при обработке данных разработанных алгоритмов автоматической сегментации и машинного обучения обеспечивает возможность анализа изменений как каждой отдельной клетки, так и всего ансамбля клеток в образце.

Исследование культур клеток пациентов перспективно для оценки резистивности пациента к фотодинамической терапии с конкретным фотосенсибилизатором и для разработки персонализированных протоколов лечения. Разработанная методика может быть использована для исследования реакции клеток на различные методы терапии.

### **Благодарность**

Работа частично выполнялась в рамках гранта РФФИ № 21-72-10044.

### **Список источников**

- [1] **Belashov, A.V.** Quantitative assessment of changes in cellular morphology at photodynamic treatment *in vitro* by means of digital holographic microscopy / A.V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, T.N. Belyaeva, N.N. Nikolsky, I.V. Semenova, E.S. Kornilova, O.S. Vasyutinskii // *Biomedical Optics Express*. – 2019. – 10. – 10. – 4975-4986.
- [2] **Zhikhoreva, A.A.** Significant difference in response of malignant tumor cells of individual patients to photodynamic treatment as revealed by digital holographic microscopy / A.A. Zhikhoreva, A.V. Belashov, A.B. Danilova, N.A. Avdonkina, I.A. Baldueva, M.L. Gelfond, T.L. Nekhaeva, I.V. Semenova, O.S. Vasyutinskii // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. – 2021. – 221. – 112235.
- [3] **Belashov, A.V.** In-vitro monitoring of photoinduced necrosis in HeLa cells using digital holographic microscopy and machine learning / A.V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, T.N. Belyaeva, E.S. Kornilova, A.V. Salova, I.V. Semenova, O.S. Vasyutinskii // *JOSA A*. – 2020. – 37. – 2. – 346-352.
- [4] **Belashov, A.V.** Machine Learning Assisted Classification of Cell Lines and Cell States on Quantitative Phase Images / A.V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, T.N. Belyaeva, A.V. Salova, E.S. Kornilova, I.V. Semenova, O.S. Vasyutinskii // *Cells*. – 2021 – 10. – 2587.
- [5] **Zhikhoreva, A.A.** Comparative analysis of Radachlorin accumulation, localization, and photobleaching in three cell lines by means of holographic and fluorescence microscopy / A.A. Zhikhoreva, A.V. Belashov, T.N. Belyaeva, A.V. Salova, I.K. Litvinov, E.S. Kornilova, I.V. Semenova, O.S. Vasyutinskii // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. – 2022 – accepted.
- [6] **Girshovitz, P.** Generalized cell morphological parameters based on interferometric phase microscopy and their application to cell life cycle characterization / P. Girshovitz, N.T. Shaked // *Biomedical Optics Express*. – 2012 – 3. – 8. – 1757.

# **Analysis of *in-vitro* cell response to photodynamic treatment using digital holographic microscopy and tomography**

*I. V. Semenova, A. V. Belashov, A. A. Zhikhoreva, O. S. Vasyutinskii*

Ioffe Institute, St.Petersburg, Russia

We present a novel approach to the analysis of cell response to photodynamic treatment based on holographic techniques. The approach allows for long-term noninvasive monitoring of cell cultures and provides quantitative data on the main morphological parameters of cells and on their changes in dynamics. The data obtained make it possible to identify the predominant mechanisms of cell death at different treatment doses. The experiments were carried out both on established cell lines and on lines obtained from tumor material of patients with different malignant neoplasms. The developed approach can be further used to evaluate the efficacy of different modalities of anticancer therapy, including personalized therapy.

*Keywords:* Holographic microscopy, Tomography, Photodynamic treatment, Cellular morphology.

# Применение методов количественного фазового имиджинга с использованием когерентного и низкокогерентного излучения для исследования реакции живых клеток на фотодинамическое воздействие

А. А. Жихорева<sup>1</sup>, А. В. Белашов<sup>1</sup>, Т. Н. Беляева<sup>2</sup>, А. В. Салова<sup>2</sup>, Е. С. Корнилова<sup>2</sup>, И. В. Семенова<sup>1</sup>, О. С. Васютинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт цитологии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты разработки методов неинвазивного долговременного мониторинга клеток с использованием голографических методов при инициации различных типов клеточной гибели. Нами было показано, что комплексный анализ десяти клеточных характеристик, извлекаемых из фазовых изображений, позволяет с высокой точностью разделить различные типы и состояния живых клеток, что может быть использовано для определения их реакции на фотодинамическое воздействие. Количественный фазовый имиджинг живых клеток может осуществляться как с помощью внеосевой цифровой голографической микроскопии, так и при использовании низкокогерентной голографии, что позволяет подавить негативное влияние когерентного шума и получить более объективные данные о параметрах клеток.

*Ключевые слова:* Количественный фазовый имиджинг, Цифровая голографическая микроскопия, Фазовое изображение, Низкокогерентная голография, Внеосевая цифровая голография.

*Цитирование:* Жихорева, А. А. Применение методов количественного фазового имиджинга с использованием когерентного и низкокогерентного излучения для исследования реакции живых клеток на фотодинамическое воздействие / А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Т. Н. Беляева, А. В. Салова, Е. С. Корнилова, И. В. Семенова, О. С. Васютинский // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 410–413.

## Введение

Методы количественной фазовой визуализации представляют большой интерес в научной литературе из-за возможности длительного мониторинга живых клеток и вычисления большого количества оптических и морфологических клеточных характеристик [1]. Использование цифровой голографической микроскопии позволяет напрямую вычислить из фазовых изображений клеток более 9 клеточных параметров, таких как средний фазовый набег, индуцированный клеткой, сухую массу и фазовый объем клетки [1]. Анализ этих клеточных параметров, полученных методами фазовой визуализации, позволяет детектировать заражение малярией эритроцитов [2], определять живые и мертвые клетки *in vitro* [3], а также выявлять клетки с патологической морфологией [4]. Однако обработка больших объемов экспериментальных данных и выявление клеточных патологий требует автоматизации процесса получения и анализа фазовых изображений [4]. В рамках данной работы был разработан и апробирован метод определения типа клеток (среди клеточных

линий HeLa, A549, 3T3), а также их состояния (живые, некротические или апоптотические клетки) на основе анализа фазовых изображений, полученных методами цифровой голографической микроскопии и TIE-визуализацией (Transport of Intensity Equation).

### Используемые методы и подходы

В ходе выполнения работы было использовано два метода: когерентная цифровая голографическая микроскопия и метод фазовой визуализации, основанный на вычислении фазы из серии распределений интенсивности расфокусированных изображений клеток при использовании уравнения переноса интенсивности. Для разработки алгоритмов классификации с помощью цифровой голографической микроскопии, основанной на интерферометре Маха-Цендера, и TIE-визуализации было зарегистрировано и восстановлено несколько десятков цифровых голограмм клеток трех типов (HeLa, A549 и 3T3) находящихся в трех состояниях (живые клетки и, погибшие путем некроза и апоптоза). В качестве регистрирующего излучения в интерферометре использовался He-Ne лазер, а TIE-визуализация реализовывалась на базе микроскопа Nikon-TI2. Зарегистрированные в голографическом микроскопе типичные фазовые изображения клеток в разных состояниях представлены на рисунке 1.

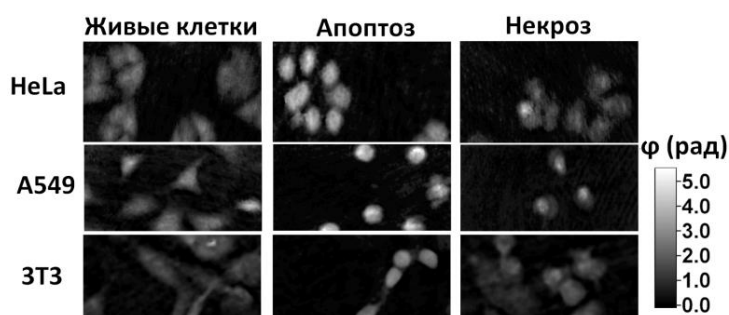


Рис. 1. Примеры фазовых распределений клеток разных типов, находящихся в разных состояниях.

В ходе численного анализа распределений интегрального фазового набег, внесенного клетками в проходящий волновой фронт, были определено 10 характеристик, описывающих: морфологические, оптические и физиологические свойства анализируемой клетки. Для оценки морфологических параметров клетки из распределения интегрального фазового набег  $\varphi(x,y)$  вычислялось пространственное распределение толщины клетки  $h(x,y)$  в предположении постоянства внутриклеточного показателя преломления  $n_{\text{cell}}=\text{const}$  по формуле 1.

$$h = \frac{\varphi \lambda (n_{\text{medium}} - n_{\text{cell}})}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения, а  $n_{\text{medium}}$  – показатель преломления окружающей среды. После сегментации отдельных клеток на фазовых изображениях и определения их параметров были составлены базы данных для каждого метода визуализации, включающие информацию о более чем 100 клетках в разных состояниях.

## Результаты

Сравнение клеточных параметров, полученных разными методами визуализации, показал, незначительное влияние когерентного шума на определение среднего фазового набега, сухой массы и фазового объема клетки. Кроме того, динамики изменений клеточных параметров при разных типах клеточной гибели одинаковы как при исследовании клеточных структур голографической микроскопией, так и при использовании ТЕ-визуализацией. На основе накопленных фазовых клеточных параметрах была проведена разработка нескольких алгоритмов машинного обучения с использованием 1) метода опорных векторов (SVM), 2) метода k-ближайших соседей (k-NN), 3) метода ансамбля классификаций алгоритмов деревьев решений и k-ближайших соседей (EC).

**Таблица 1.** Точность классификации по состояниям и типам клеток с использованием разных алгоритмов.

Тип классификации\Метод	SVM	k-NN	EC
Состояния клеток HeLa	89,4%	84,4%	85,0%
Состояния клеток A549	90,0%	89,0%	82,0%
Состояния клеток 3T3	88,9%	82,7%	83,9%
Тип живых клеток	92,7%	78,1%	81,7%

Для каждого из разработанных алгоритмов проводилась оценка точности классификации при классификации между тремя состояниями одного и того же типа клеток (строки 2-4 таблицы 1) или классификации между типами живых клеток (нижняя строка таблицы 1)

## Заключение

В ходе работы было показано, что точность определения клеточных параметров, таких как средних фазовый набег, сухая масса и фазовый одинакова для обоих используемых методов фазовой визуализации. В ходе анализа зарегистрированных параметров было установлено, что наибольшая точность классификации достигается при использовании метода опорных векторов. При этом классификация по состояниям и типу клеток может быть проведена с точностью около 90%. Таким образом, в настоящей работе было продемонстрировано, что методы фазовой визуализации позволяют получить важные количественные данные о биологических объектах. Анализ этих параметров с помощью алгоритмов машинного обучения позволяет проводить точную классификацию клеток по типу и состоянию.

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-72-10044).

## Список источников

- [1] **Kim, Myung K.** "Digital holographic microscopy." Digital Holographic Microscopy. Springer, New York, NY, (2011).

- [2] **Singla**, Neeru, Vishal Srivastava, and Dalip Singh Mehta. "Development of full-field optical spatial coherence tomography system for automated identification of malaria using the multilevel ensemble classifier." *Journal of biophotonics* 11.5 (2018): e201700279.
- [3] **Жихорева А. А.** и др. "Разработка системы автоматической классификации живых и мертвых клеток на основе анализа их фазовых изображений" в XXXI Международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике: материалы школы-симпозиума. УрФУ им. Б.Н. Ельцина (2019): 59-60.
- [4] **Javidi, Bahram**, et al. "Automated cell identification with compact field portable 3D optical imaging." in *proceedings SPIE: Optical Methods for Inspection, Characterization, and Imaging of Biomaterials IV*. Vol. 11060. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [5] **Belashov, A. V.**, et al. "Machine Learning Assisted Classification of Cell Lines and Cell States on Quantitative Phase Images." *Cells* 10.10 (2021): 2587.

## **Application of machine learning classification algorithm for distinguishing between cells lines and states based on digital holographic microscopy**

*A. A. Zhikhoreva<sup>1</sup>, A. V. Belashov<sup>1</sup>, T. N. Belyaeva<sup>2</sup>, A. V. Salova<sup>2</sup>, E. S. Kornilova<sup>2</sup>,  
I. V. Semonova<sup>1</sup>, O. S. Vasyutinskii<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Institute of Cytology of RAS, Saint-Petersburg, Russia

We report development and validation of machine learning classification algorithm aimed at distinguishing between cells lines and states based on analysis of their phase images obtained by digital holographic microscopy. The developed algorithm demonstrate classification accuracy between three cells lines or three cells states (living cells, necrosis, apoptosis) of about 90% using support vector machine algorithm.

*Keywords:* Digital holographic microscopy, Cells death, Phase images, Classification.

# Мультиспектральная фантомная визуализация с излучением суперконтинуума: верификация концепции

*Е. Н. Опарин, В. С. Шумигай, А. О. Исмагилов, А. В. Черных, Н. В. Петров, А. Н. Цыпкин*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Предложена и реализована методика восстановления амплитудных изображений на основе фантомной визуализации со спектральным мультиплексированием при использовании одного ПВМС. В работе использовался выделенный диапазон спектрального суперконтинуума от 560 до 680 нм. Мультиплексирование осуществлялось при помощи двух дифракционных решеток, которые осуществляли спектральное разделение входного пучка. Независимая фазовая модуляция проводилась на 10 спектральных каналах, для которых были выделены отдельные участки матрицы ПВМС. После дифракции на исследуемом объекте излучение фокусировалось на датчик спектрометра, где одновременно регистрировались наборы интенсивностей спектральных каналов.

*Ключевые слова:* Фантомная визуализация, Спектральный суперконтинуум, Пространственный модулятор света, Передача информации, Дистанционное зондирование.

*Цитирование:* **Опарин, Е. Н.** Мультиспектральная фантомная визуализация с излучением суперконтинуума: верификация концепции / Е. Н. Опарин, В. С. Шумигай, А. О. Исмагилов, А. В. Черных, Н. В. Петров, А. Н. Цыпкин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 414–416.

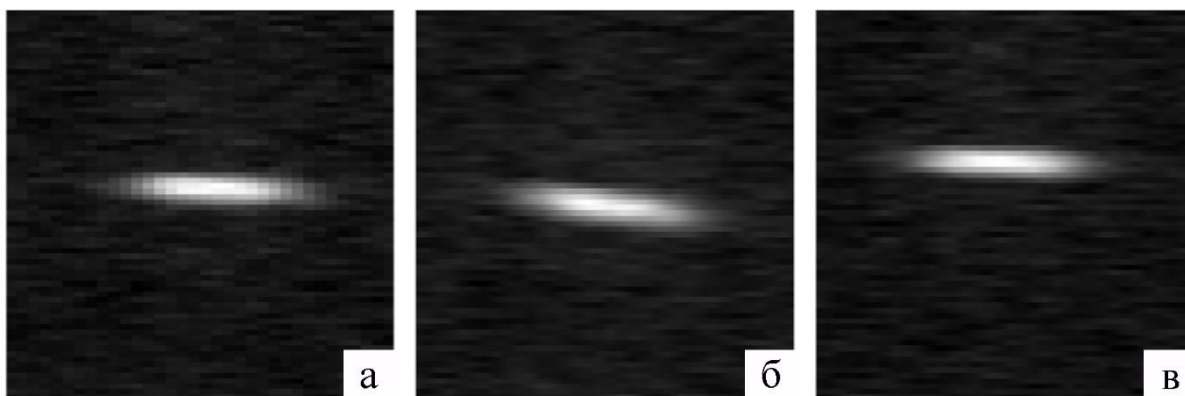
Одним из эффективных методов дистанционного отслеживания объектов в условиях зашумленности [1] является фантомная визуализация, которая основывается на вычислении корреляционной функции между парами сигнальных и холостых фотонов [2]. В классической интерпретации фантомной визуализации исследуемый объект освещается набором псевдослучайных структур, сигнальные фотоны, прошедшие через образец, регистрируются единичным детектором, а холостые, продублированные от входного излучения, – матричным детектором. Корреляция между этими двумя сигналами позволяет восстанавливать поперечное амплитудное изображение объекта. Однако, при использовании пространственно-временного модулятора света (ПВМС) можно контролировать структуру поля, освещающую объект, и отказаться от регистрации холостого сигнала, задействовав в вычислениях только его компьютерную модель распределения [3]. Помимо этого, применение ПВМС позволяет сделать технику фантомной визуализации динамически адаптируемой к пространственным параметрам поля и исследуемого образца [4].

Техника фантомной визуализации ограничена скоростью ее реализации и не подходит для восстановления динамически-меняющихся объектов, поскольку требуется регистрация порядка нескольких тысяч взаимно независимых сигналов. Ускорение реализации методики фантомной визуализации возможно за счет перехода от последовательного освещения спекл-структурами к параллельному, используя, например, излучение на различных длинах волн [5]. В работе [5] использовалось излучение на трех длинах волн, каждой из которых

пропускалось через отдельный ПВМС. В данной работе представлена методика фантомной визуализации со спектральным десяти-канальным мультиплексированием, когда в каждом канале содержатся взаимно независимые спекл-структуры поля, сформированные на одном ПВМС.

В качестве источника излучения использовался суперконтинуум в видимом диапазоне длин волн, полученный посредством лазерной филаментации фемтосекундного излучения в воде [6]. Мультиплексирование спектральных компонент осуществлялось за счет двух дифракционных решеток. Спектрально-разделенный коллимированный пучок в диапазоне 560-680 нм освещал матрицу ПВМС, причем так, что каждая выделенная компонента пучка дифрагировала на отдельной площадке матрицы. После отражения от матрицы ПВМС спектрально мультиплексированный пучок от этих же дифракционных решеток фокусировался ахроматической линзой, формируя изображение в плоскости исследуемого объекта «щель» с шириной 1,5 мм. Прошедшее излучение через щель фокусировалось на детекторе спектрометра, где одновременно регистрировалась интенсивность по десяти отдельным спектральным каналам.

В ходе проведения эксперимента было использовано 5000 псевдослучайных спекл-структур. После процедуры обработки данных было восстановлено изображение щели (рис. 1а). Для верификации концепции было проведено еще два измерения, на рис. 1б и рис. 1в показано восстановленное изображение щели в случаях поворота и сдвига щели соответственно.



**Рис. 1.** Восстановленные изображения щели первоначальное положение (а), повернутое (б) и смещенное по вертикали (в).

Таким образом, экспериментально была продемонстрирована возможность увеличения скорости регистрации данных в методе фантомной визуализации за счет спектрального мультиплексирования по десяти независимым каналам.



## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903). The study was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903).

## Список источников

- [1] **Clemente P.** Optical encryption based on computational ghost imaging / P. Clemente [et al.] // Optics Letters. – 2010. – Vol. 35. – № 14. – P. 2391.
- [2] **Padgett M. J.** An introduction to ghost imaging: quantum and classical / M. J. Padgett, R. W. Boyd // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2017. – Vol. 375. – № 2099. – P. 20160233.
- [3] **Shapiro J. H.** Computational ghost imaging / J. H. Shapiro // Physical Review A. – 2008. – Vol. 78. – № 6. – P. 061802.
- [4] **Adam I. A.** Computational ghost imaging with the sweeping algorithm / I. A. Adam [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1984. – № 1. – P. 012004.
- [5] **Zhang D.-J.** Wavelength-multiplexing ghost imaging / D.-J. Zhang [et al.] // Physical Review A. – 2015. – Vol. 92. – № 1. – P. 013823.
- [6] **Тсыпкин А. Н.** Generation of high-intensity spectral supercontinuum of more than two octaves in a water jet / A. N. Tsyarkin [et al.] // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55. – № 29. – P. 8390.

## Multispectral ghost imaging with supercontinuum radiation source: proof of concept study

*E. N. Oparin, V. S. Shumigay, A. O. Ismagilov, A. V. Chernykh, N. V. Petrov, A. N. Tsyarkin*  
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The technique of amplitude image reconstruction based on wavelength-multiplexing ghost imaging with a single SLM has been proposed and implemented. A separated spectral supercontinuum range from 560 to 680 nm was used in this work. Multiplexing of the spectral components was carried out via two diffraction gratings, which performed spectral separation of the input beam. Independent phase modulation was performed on 10 spectral channels, for which separate areas of the SLM matrix were allocated. After diffraction on the studied object, the light was focused to the spectrometer sensor, where the sets of spectral channel intensities were simultaneously registered.

*Keywords:* Ghost imaging, Supercontinuum, Spatial light modulator, Data transmission, Remote sensing.

# Оценка погрешности величины хорды при видеоэндоскопии рабочих лопаток паровых турбин большой единичной мощности

*Л. С. Родикова, В. В. Коротаев, А. Н. Тимофеев*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе анализируются возможности создания системы видеоэндоскопирования, предназначенной для контроля дефектов лопаток паровых турбин большой единичной мощности. Видеосистемы для бесконтактного контроля нашли эффективное применение для контроля износа лопаточного аппарата без их вскрытия паровых турбин. Данный тип систем продолжает развиваться в направлении совершенствования аппаратных и программных средств видеоэндоскопии. Применение синхронизации подсветки при формировании и обработке видеоизображений позволяет оценивать величину дефектов на кромках рабочих лопаток.

*Ключевые слова:* Система видеоэндоскопирования, Контроль геометрических параметров, Хорда рабочей лопатки, Турбины паровые, Цифровая обработка изображений, Оптимизация подсветки.

*Цитирование:* Родикова, Л. С. Оценка погрешности величины хорды при видеоэндоскопии рабочих лопаток паровых турбин большой единичной мощности / Л. С. Родикова, В. В. Коротаев, А. Н. Тимофеев// HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 417–420.

Рабочие лопатки (РЛ) паровой турбины наиболее уязвимый элемент конструкции, так как они повреждаются в процессе эксплуатации турбины вследствие каплеударных нагрузок и протекающих эрозийных процессов [1]. Контроль состояния РЛ, как правило производится при разборе турбины. Однако разбор турбины с целью диагностики её состояния влечет за собой финансовые потери, связанные с выводом турбины из эксплуатации [2].

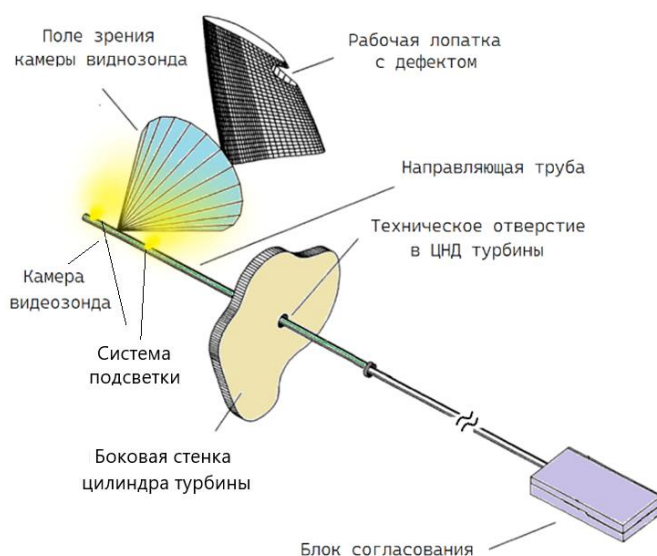
Применение оптико-электронной системы видеоэндоскопирования в сочетании с методами технического зрения позволяет проводить диагностику состояния лопаточного аппарата без вскрытия паровой турбины и обеспечивает необходимую точность контроля параметров [3, 4, 5].

При работе системы видеоэндоскопирования через специально выполненный канал вставляется в закрытый цилиндр, после чего в режиме валоповорота осматриваются все лопатки. Система захватывает изображение каждой из лопаток, эти кадры передаются в блок обработки изображения, где с помощью специально разработанного программного обеспечения происходит количественный анализ параметров лопаток [6].

При этом диагностика эрозийного износа РЛ паровых турбин усложняется рядом таких факторов как ограниченные объемы размещения элементов системы контроля, сложность формы поверхности РЛ и специфических условий применения (высокая рабочая температура и относительная влажность воздуха)

Целью исследований является оценка погрешности определения дефекта рабочей лопатки по размеру хорд сечений рабочих лопаток за счет оптимизации ракурсов изображений и синхронной подсветки адаптивной по уровню.

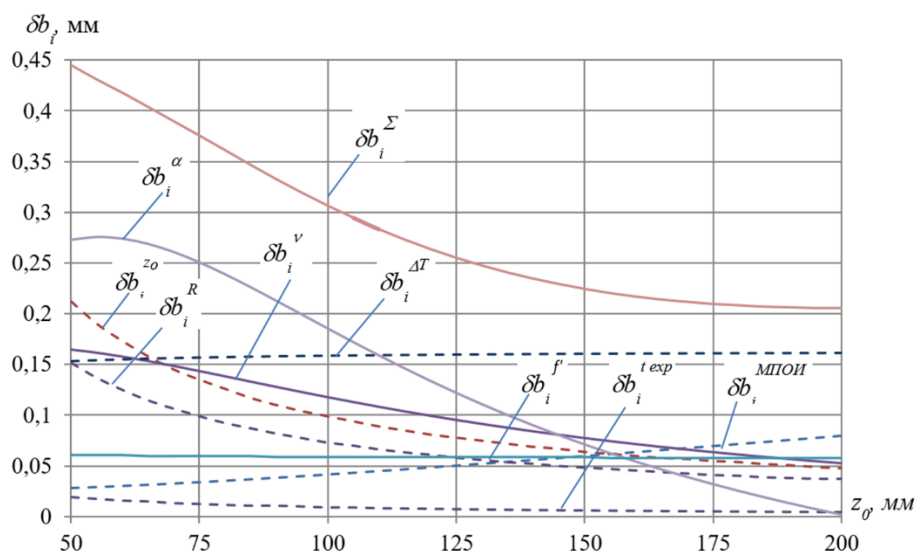
Съёмка кадров каждой РЛ осуществляется с помощью видеозонда (рисунок 1), который включает в себя импульсный источник излучения и видеокамеру. Источник излучения включается во время прохождения лопатки в поле зрения камеры в этот момент и происходит захват изображения. Изображения поступают на блок согласования, который обеспечивает их обработку, в соответствии с сигналами синхродатчика.



**Рис. 1.** Поле обзора видеокамеры видеозонда при осмотре рабочей лопатки

При оценках суммарной погрешности  $\delta b_i^{\Sigma}$  рассматривались: погрешность определения границ изображения РЛ на матричном поле анализа  $\delta b_i^{МПОИ}$ , погрешность фокусного расстояния оптической системы ВК  $\delta b_i^f$ , погрешность, вызванная неопределенностью расстояния до центра РЛ  $\delta b_i^{z_0}$ , погрешность, вызванная изменением углов наклона хорды по сечениям РЛ  $\delta b_i^{\alpha}$  погрешность, вызванная неопределенностью радиуса сечения РЛ  $\delta b_i^R$ , погрешность, вызванная нестабильностью времени экспозиции видеокамеры  $\delta b_i^{exp}$ , погрешность, вызванная температурной деформацией корпуса зонда  $\delta b_i^{\Delta T}$ , погрешность, вызванная нестабильностью частоты вращения ротора  $\delta b_i^v$ .

Оценки погрешности (рисунок 2) проводились для: объектива видеозонда с фокусным расстоянием  $f_{об} = 3,5$  мм; размере пикселя матричного фотоприемника  $2,25 \times 2,25$  мкм; частоте кадров 30 Гц; времени экспозиции, составляющем 0,8 от времени кадра и отношение сигнал/шум равном 300. При этом рассматривался наихудший случай, когда расстояние от оси вала до сечения лопатки составляло 1750 мм, величине хорды была равна 200 мм и ориентирована под углом 40 угл. град к оси визирования.



**Рис. 2.** Графики к оценкам степени влияния составляющих погрешностей на суммарную погрешность в зависимости от дистанции до рабочей лопатки

Компьютерные и экспериментальные исследования рационального пространственного размещения видеокамер и регулировки яркости нескольких источников синхронной подсветки показали, что при вращении модели лопаточной системы с частотой 1 об/мин обеспечивается СКО погрешности определения величины хорды менее чем 0,3 мм.

Дальнейшие исследования следует продолжить в направлении оптимизации количества видеокамер и источников подсветки для формирования модели рабочей лопатки максимально приближенной к ее фактической форме.

### Список источников

- [1] **Хаимов, В. А.** Система оперативного контроля и диагностики эрозионного износа лопаточного аппарата паровых турбин / В. А. Хаимов, В. М. Ляпунов., А. М. Рубинов, С.О. Шелест // Труды ЦКТИ. — 2003. — Вып. 292. — С. 114-122.
- [2] **Мачихин, А. С.** Измерительные возможности современных видеоэндоскопов / А. С. Мачихин // Двигатель. — 2009. — № 3. — Р. 8-10.
- [3] **Хаимов, В. А.** Малорасходные режимы ЦНД турбины Т-250/300-240 / Под ред. В. А. Хаимова — СПб: БХВ-Петербург, 2007. — 240 с.
- [4] **Кульчицкий, А.А.** Система контроля геометрии осесимметричных изделий с угловым зеркальным преобразователем турбин / А.А. Кульчицкий, А.И. Потапов, А.Г. Смирнов, В.И. Бойков // изв. Вузов. Приборостроение. — 2020. — Vol 63. — № 8. — Р. 720-726.
- [5] **Скворцов, Б.В.** Методы дистанционных измерений геометрических параметров объектов / Б.В. Скворцов, И.Ю. Жиганов, А.Н. Малышева-Стройкова — М.: Ламберт, 2012. — 320 с.
- [6] **Шуть, Г.А.** Видеоэндоскопирование рабочих лопаток паровых турбин и контроль их геометрических параметров / Г.А. Шуть Г.А., В.В. Коротаев., Е.И. Пузырев Е.И., Рыжова В.А., А.Н. Тимофеев А.Н., А.Х. Ахмеров, Л.С.. Родикова // Оптический журнал. — 2020. — Т.87. — №11. — С. 58-67.

# **Estimation of the chord magnitude error during video endoscopy of steam turbine blades of large unit power**

*L. S. Rodikova, V. V. Korotaev, A. N. Timofeev*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The paper analyzes the possibilities of creating a video endoscopy system designed to control defects in the blades of steam turbines of large unit power. Video systems for contactless control have become effectively used to control the wear of the blade apparatus without disassembling steam turbines. This type of systems continues to develop in the direction of improving the hardware and software of video endoscopy. The use of backlight synchronization in the formation and processing of video images allows us to estimate the magnitude of defects on the edges of the blades.

*Keywords:* Video endoscopy system, Non-contact geometric parameter control, Blade chord, Steam turbines, Digital image processing, Backlight optimization.

# Перспективы применения спекл-фотоники процессов, протекающих в живой и неживой материи

*А. П. Владимиров*

Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
Уральский федеральный университет имени Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия  
Екатеринбургский НИИ вирусных инфекций ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора,  
Екатеринбург, Россия

Рассмотрены теория, экспериментальное обоснование и перспективы использования метода усредненных во времени спекловых изображений для количественного анализа необратимых и обратимых процессов, протекающих в ряде живых и неживых объектов. Обсуждаются перспективы создания и применения: оптических и неоптических датчиков нового поколения матричного типа для неразрушающего контроля деталей и элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости; спекл-томографов функций живой клетки и турбулентных потоков, позволяющих в режиме реального времени контролировать необратимые процессы в областях минимального размера порядка 1 мкм; методов численного расчета напряженного-деформированного состояния деталей на стадии зарождения, старта и движения трещины; методов оценки остаточного ресурса элементов конструкций.

*Ключевые слова:* Фотоника, Спеклы, Изображение, Живые клетки, Многоцикловая усталость, Турбулентность, Томография, Реальное время.

*Цитирование:* **Владимиров, А. П.** Перспективы применения спекл-фотоники процессов, протекающих в живой и неживой материи / А. П. Владимиров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 421–429.

## Введение

В данной публикации перспективы использования спекл-фотоники рассмотрены на примере необратимых процессов, протекающих в живых клетках, при многоциклового усталости стали и в турбулентном потоке нагретого воздуха.

В настоящее время имеются томографы, обеспечивающие визуализацию структур клетки, но отсутствуют методики, позволяющие на малых участках внутри клетки в режиме реально времени определять параметры, характеризующие функционирование (функции) живой клетки.

Согласно разным оценкам, от 50 до 80% деталей техники разрушаются вследствие их многоциклового усталости [1–3]. Несмотря на большую историю изучения и многочисленные публикации по этой теме, отсутствуют методы оценки и расчета остаточного ресурса элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости, которые удовлетворяли бы требованиям инженерной практики [3].

Трехмерный когерентно - оптический количественный анализ потоков жидкостей и газов детально разработан для ламинарных потоков [4], однако при его использовании для изучения турбулентных потоков возникают большие методические трудности.

Целью статьи является демонстрация возможностей метода усредненных во времени спекловых изображений в решении указанных выше проблем и обсуждение перспектив практического его применения.

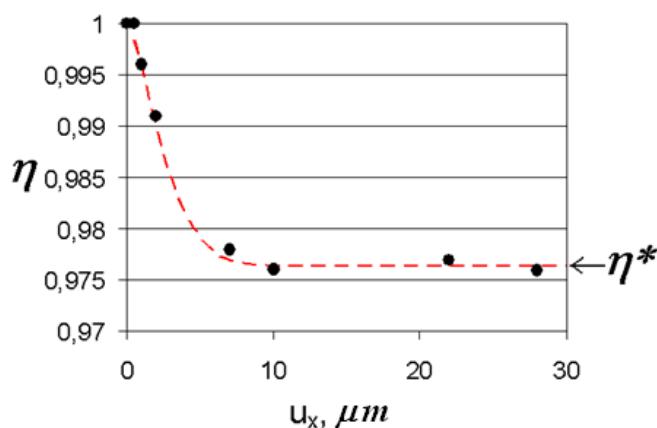
## 1. Теория метода

Теория метода для отражающих объектов была опубликована в статьях [5,6], а для прозрачных объектов, расположенных вблизи случайно-фазового экрана в [7,8]. Предполагалось, что в общем случае объекты одновременно перемещаются поступательно, совершают периодические движения, центры рассеяния отражающего объекта случайным образом перемещаются в пространстве, а показатель преломления прозрачного объекта случайным образом изменяется во времени. Определяемой физической величиной являлась разность оптических путей  $\Delta u$  двух волн, распространяющихся на среднем, характерном расстоянии  $\Delta s$  в пределах области, размер которой равен линейному разрешению линзы  $2a_s$ . На основе аналитического решения задачи о динамике спеклов в плоскости изображения указанных выше объектов были получены выражения для средней по времени интенсивности излучения  $\tilde{I}$  в произвольной точке плоскости изображения и для нормированной временной автокорреляционной функции  $\eta(t_1, t_2)$  этой интенсивности, где  $t_1$  и  $t_2$  - начальный и текущий моменты времени. Согласно [5,7] в формуле для  $\tilde{I}$  величина  $\tilde{I}$  является функцией среднего по времени экспозиции значения  $\Delta u$ , а также дисперсии  $\sigma_{\Delta u}^2$  величины  $\Delta u$ . В формуле для  $\eta(t_1, t_2)$  величина  $\eta$  зависит средних по ансамблю статистически подобных объектов значений  $\langle \Delta u_1 \rangle$  и  $\langle \Delta u_2 \rangle$  величины  $\Delta u$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно, дисперсий  $k_{11}$  и  $k_{22}$  величин  $\langle \Delta u_1 \rangle$  и  $\langle \Delta u_2 \rangle$  соответственно, а также от нормированной временной автокорреляционной функции  $\rho(t_1, t_2)$  величины  $\Delta u$ . Отметим, что в статье [9] для стационарного процесса  $\Delta u(t)$  аналитически была получена формула, связывающая спектральные функции флуктуаций величин  $\Delta u$  и  $\tilde{I}$ . Для отражающего объекта  $\Delta u = \Delta \vec{u}(\vec{l}_s + \vec{l})$ , а для прозрачного объекта  $\Delta u = \Delta n \times L$ , где  $\Delta \vec{u}$  - вектор относительного перемещения двух точек поверхности, расположенных на расстоянии  $\Delta s$ ,  $\vec{l}_s, \vec{l}$  - единичные векторы, направленные от центра области размером  $2a_s$  к источнику света и к центру линзы соответственно,  $\Delta n$  разность показателя преломления на базе  $\Delta s$ ,  $L$  - толщина объекта.

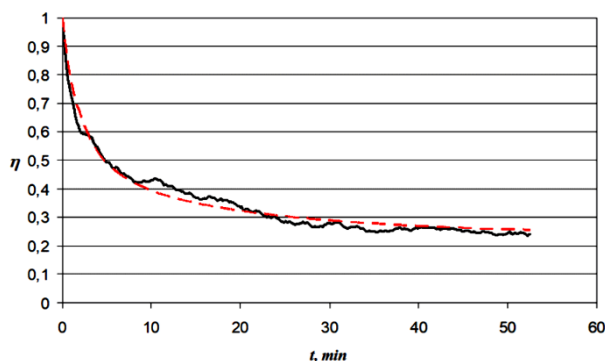
В статьях [6,8] теория, представленная в [5,7], была модернизирована. В статье [8] формулы для  $\tilde{I}$  и  $\eta(t_1, t_2)$  были получены в предположении, что величина  $\Delta u$  является суммой  $M$  независимых величин. Было показано, что значения  $\langle \Delta u_1 \rangle$ ,  $\langle \Delta u_2 \rangle$ ,  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $\rho(t_1, t_2)$ , соответствующие величине  $\Delta u$ , являются суммами аналогичных величин, соответствующих слагаемым  $\Delta u_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) величины  $\Delta u$ . В статье [6] для малых по сравнению с длиной

волны значений  $\Delta u_m$  предложена процедура выделения из флуктуаций  $\tilde{I}$  вкладов, соответствующих величинам  $\Delta u_m$ , получены формулы для определения дисперсии  $\sigma_m^2$  и времени релаксации  $\tau_{0m}$  величины  $\Delta u_m$ .

На рис.1 и 2 приведены теоретические и экспериментальные зависимости  $\eta(t_1, t_2)$ , полученные в [9] для прозрачной шероховатой пластины, и в [8] для живых клеток, осажженных на прозрачную пластину сразу после их размораживания. На рис.1 различие теоретических и экспериментальных данных было в пределах 2 %, значения параметра шероховатости  $R_a$ , найденного по постоянному уровню  $\eta^*$  величины  $\eta$  и профилометром, отличались на 5%. На рис.2 коэффициент корреляции массивов теоретических и экспериментальных данных равнялся 0,99. Теоретическая кривая была получена в предположении, что на изменении величины  $\Delta u$  влияют 4 фактора: процессы в питательном растворе, внутриклеточные процессы, контакты клеток, их хаотическое движение. Отметим также, что в статьях [5] и [10] показано, что теоретические и экспериментальные значения компоненты вектора  $\Delta \vec{u}$  и показателя преломления хорошо совпадают, если принять, что база измерения  $\Delta s$  равна линейному разрешению линзы  $2a_s$ .



**Рис. 1.** Теоретическая (пунктирная линия) и экспериментальная (точки) зависимости величины  $\eta$  от перемещения  $u_x$  прозрачной пластины [9]

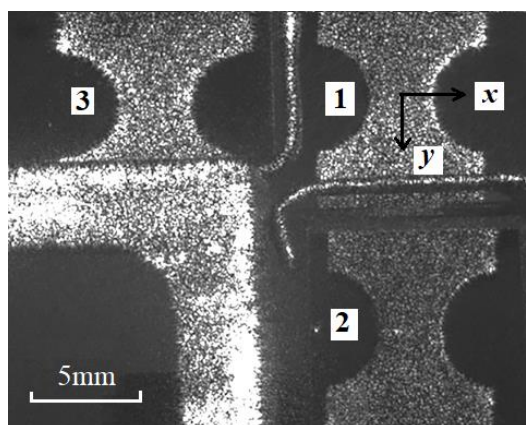


**Рис. 2.** Теоретическая (пунктир) и экспериментальная (непрерывная кривая) нормированные временные автокорреляционные функции, полученные в опыте с живыми клетками [8]

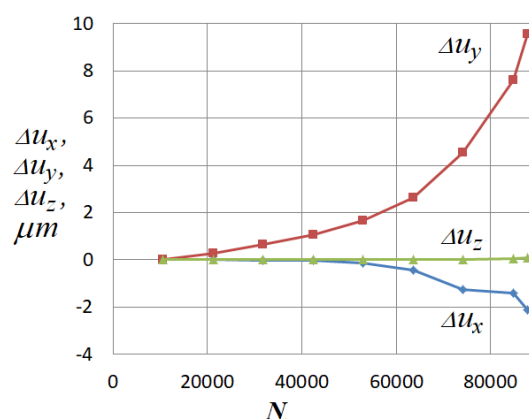


## 2. Эксперименты

На рис. 3а приведены три спекловых изображения одного образца, зарегистрированные на одном кадре под тремя ракурсами наблюдения, детали опыта приведены в статье [11]. Образец из низкоуглеродной стали с двумя выточками радиусом 2,5 мм был испытан на многоцикловую усталость на машине резонансного типа. По трем квазипериодическим изменениям величины  $\tilde{I}$ , зарегистрированным в трех пикселях, соответствующих зоне зарождения трещины, были построены зависимости трех компонент вектора  $\Delta\vec{u}$  от числа циклов нагружения  $N$ , рис.3б. Из рис.3б следует, что предельное значение растягивающей деформации, найденное как отношение  $\Delta u_y / \Delta s$ , имеет порядок  $10^{-1}$ , т.е. по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при квазистатическом растяжении стандартных образцов на разрыв. По рассмотренной в теории методике нами были построены зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для необратимых процессов, протекающих на стадии накопления повреждений при многоциклового усталости стали 09Г2С, в группе живых культивированных клеток и в разных частях отдельной клетки линии L-41, в турбулентном потоке нагретого воздуха.



а) при спекловых изображения образца



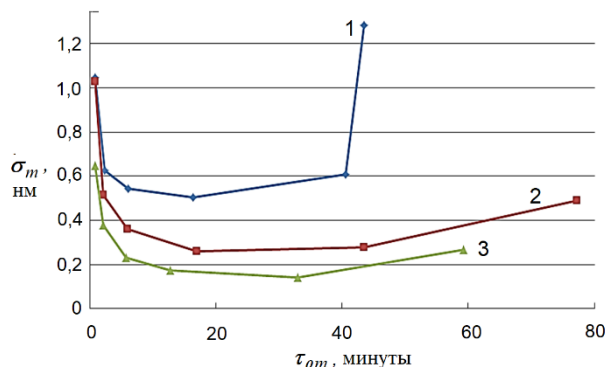
б) зависимости компонент  $\Delta\vec{u}$  от числа циклов  $N$

**Рис. 3.** Спекловые изображения образца под тремя ракурсами наблюдения (а) и зависимости трех компонент вектора  $\Delta\vec{u}$  от числа циклов  $N$  нагружения (б)

Обнаружено, что на стадии накопления повреждений в стали 09Г2С протекают три процесса с разными временами корреляции величин  $\Delta u_m$  ( $m = 1, 2, 3$ ). При фиксированных  $\tau_{0m}$  зависимости  $\sigma_m$  от числа циклов  $N$  качественно согласуются с особенностями накопления вновь образующихся микротрещин, выявленными в работе [12].

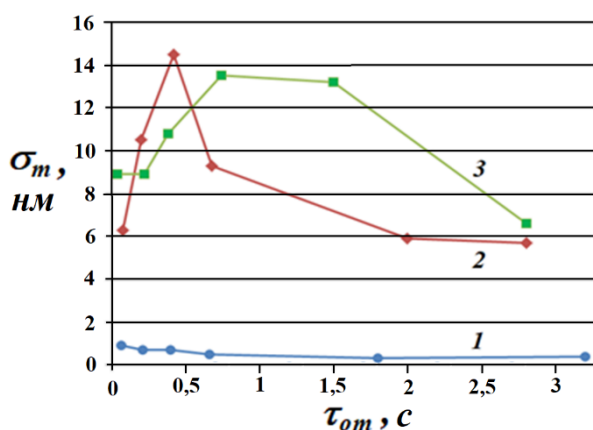
По зависимостям  $\sigma_m(\tau_{0m})$ , зарегистрированным в группе из 16 клеток до и после введения хлоргексидина, было обнаружено, что после добавления токсичного вещества исчезают процессы со временами релаксации от 8 до 60 минут. В тоже время на разных участках отдельной взятой клетки процессы с указанными временами корреляции частично сохраняются (рис.4). На рис.4 приведены совмещенные зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для питательного

раствора, участка размером  $2 \times 2$  мкм в цитоплазме клетки до и после введения хлоргексидина.



**Рис. 4.** Совмещенные кривые  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для питательного раствора (3), клеток в питательной среде до (1) и после (2) введения хлоргексидина

На рис. 5 приведены совмещенные зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для воздуха до появления турбулентного потока, на стадии формирования турбулентности и в стационарном турбулентном потоке. Турбулентное течение формировали нагретым паяльником, закрепленным вертикально, флуктуации цифровых значений  $\tilde{I}$  регистрировали в центре потока. Получено вполне удовлетворительное совпадение средней по диаметру потока температуры, найденной по величине  $\eta(56^\circ\text{C})$  и измеренной термопарой ( $62^\circ\text{C}$ ). Обнаружена также хорошая корреляция профиля температуры потока и профиля  $\sigma_m$  для  $\Delta u_m$  с максимальным временем корреляции.



**Рис. 5.** Совмещенные зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для воздуха (1), на стадии формирования турбулентности (2) и в стационарном турбулентном потоке (3)

### Обсуждение результатов и перспектив применения метода

После публикации [11] можно констатировать, что впервые в мире создан когерентно-оптический метод, позволяющий определять деформации, вызванные изменением формы или объема газов, жидкостей и твердых тел живой или неживой материи на минимальной базе порядка 1 мкм. В методе, по существу, используется сдвиговый интерферометр, в

котором отсутствует оптика, создающая сдвиг волн. Высокая чувствительность метода, позволяющая определять величину  $\Delta u$  с точностью порядка 1 нм с использованием обычных телекамер и 0,1 нм малощумящими фотоприемниками, основана на эффекте спонтанной синхронизации фаз волн в спекл-полях [13,14,10]. Эффект синхронизации фаз  $K$  волн возникает при наличии градиента перемещения (отражающий объект) или показателя преломления (прозрачная среда), интерференция  $K$  волн эквивалентна интерференции двух волн с новой длиной волны  $\lambda_0 = \lambda/K$ .

Совпадение предельной локальной деформации в области зарождения усталостной трещины с предельной деформацией образцов при их квазистатическом растяжении имеет важное научное и практическое значение. Становится ясно, какова физическая причина локализации деформаций и почему существующие методы неразрушающего контроля не обнаруживают многоцикловую усталость. При испытании на многоцикловую усталость образцов типичных размеров возникают абсолютные и относительные перемещения точек поверхности порядка 1 мкм. Тогда в зоне зарождения трещины деформация порядка 0,1 должны локализоваться в области порядка 10 мкм. Существующие методы контроля имеют базу измерения в лучшем случае порядка 1 мм, обычно это сантиметры, а то и дециметры. Кроме того, при использовании малобазовых датчиков необходимо еще и попасть в зону зарождения трещины, что очень маловероятно. Поэтому необходимо создавать датчики неразрушающего контроля нового поколения матричного типа с размерами чувствительных ячеек порядка 10 мкм. Одиночные датчики такого размера практически для всех методов неразрушающего контроля созданы, поэтому разработка датчиков матричного типа технически возможна. По-видимому, сначала нужно разработать матрицы размером 8×8 ячеек, затем из них собирать матрицы большего размера. При создании таких матриц метод усредненных во времени спекловых изображений можно использовать для целеуказания поврежденных участков и калибровки датчиков.

Создание датчиков матричного типа позволило бы оценивать остаточный ресурс деталей на основе концепции, предложенной в статьях [10,14]. Зная предельное значение физической величины в локальной зоне зарождения трещины, и определяя в реальном времени скорость изменения этой величины, можно оценить время до старта трещины.

Спекловый метод определения деформаций на малых базах может быть использован для отладки процедуры численного расчета методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния элементов конструкций на стадиях зарождения, старта и движения трещины. Недостаток МКЭ для решения подобных задач заключается в том, что в зависимости от способа разбиения модели тела на элементы можно получить различные результаты. Для корректного расчета нужен ответ, т.е. информация об эволюции реальных полей компонент вектора  $\Delta \vec{u}$ .

Важное практическое значение имеет разработка и изготовление спекл-томографов отражающих и прозрачных твердых тел, а также живых клеток и турбулентных течений. Для прозрачных объектов появляется возможность послойного изучения необратимых процессов

на  $M$  участках по толщине объекта. Путем регистрации в реальном времени величин  $\tilde{I}$  и  $\eta$  под разными ракурсами освещения, наблюдения и (или) на разных длинах волн, можно сформировать систему трансцендентных уравнений, число которых равно числу неизвестных величин. Неизвестными величинами в общем случае являются средние значения и дисперсии величин  $\Delta u_m$  в начальный  $t_1$  и текущий  $t_2$  моменты времени, смешанные корреляционные моменты величин  $\Delta u_m$ , взятых в начальный и текущий моменты времени.

Путем решения указанной системы уравнений и определения неизвестных величин для процессов, протекающих на разном масштабном уровне отражающего объекта можно определять средние значения компонент вектора  $\Delta \vec{u}_m$ , их дисперсии и временные автокорреляционные функции (времена релаксации), а для стационарных и эргодических процессов  $\Delta u_m(t)$  - их спектральные функции.

В прозрачных средах показатель преломления зависит от плотности, следовательно, от температуры, а значит от выделенной или поглощенной энергии  $E$  химических реакций, от удельной преломляющей способности  $\bar{r}$  веществ, входящих в состав объекта, а также от их относительной концентрации  $C$ . В живых клетках и в турбулентном потоке факела пламени скорости флуктуаций величин  $E$ ,  $\bar{r}$  и  $C$  могут быть различными. Поэтому процессы, связанные с изменениями величин  $E$ ,  $\bar{r}$  и  $C$  будут располагаться на разных участках временного спектра флуктуаций  $\Delta u_m$ , найденного по ее временной автокорреляционной функции. Как показано на рис.4, интерпретация спектров возможна путем ингибирования (подавления) конкретных процессов, протекающих внутри прозрачной среды. Известно, например [15], что при введении хлоргексидина в живую клетку блокируются процессы, регулирующие осмотическое давление в клетке и обмена веществ через клеточную мембрану.

Автор полагает, что создание спекл – томографа живой клетки с технической точки зрения не является слишком сложной задачей. Использование такого прибора в научных исследованиях позволило бы создавать физические модели функционирования клеток в норме и при введении в клетку лекарственных препаратов. В практической медицине спекл-томограф можно было бы использовать для регистрации спектров флуктуаций  $\Delta u_m$  на разных участках и слоях клетки-свидетеля пациента. Полученные данные можно в дальнейшем использовать для его индивидуального лечения.

Использование спекл-томографа может быть полезным также при изучении процессов горения и тепло-массопереноса в турбулентных потоках.

### **Заключение**

На основе данных, полученных методом спекл-фотоники в ходе исследования необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и неживых объектах, можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в мире создан когерентно-оптический метод, позволяющий в режиме реального времени на минимальной базе порядка 1 мкм определять деформации твердых, жидких и газообразных тел, вызванных изменением формы и объема объектов живой и неживой материи.
2. Теоретически и экспериментально обоснован спекл-томограф, предназначенный для послойного определения параметров, характеризующих функционирование живых клеток и факелов турбулентных потоков.
3. Впервые показано, что предельная локальная растягивающая деформация в зоне зарождения трещины в условиях многоциклового усталости по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при квазистационарном растяжении стандартных образцов.
4. Обоснованы:
  - актуальность создания датчиков неразрушающего контроля нового поколения матричного типа, позволяющих оценивать остаточный ресурс элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости;
  - использование спекл-фотоники для оптимизации метода конечных элементов при расчете напряженно-деформированного состояния тел на стадии зарождения, старта и движения трещины;
  - изготовление и применение спекл-томографа живой клетки для целей научной и практической медицины;
  - применение спекл-фотоники для количественного анализа факелов турбулентных потоков.

### Благодарности

Автор благодарит своих коллег Бахарева А. А., Михайлову Ю. А., Каманцева И. С., Друкаренко Н. А., Мызнова К. Е. за плодотворное сотрудничество при проведении экспериментов.

### Литература

- [1] **Brinckmann, S.** On the role of dislocations in fatigue crack initiation [Dissertation] — Groningen: University of Groningen. — 2005.
- [2] **Новиков, И. И.** Физическая механика реальных материалов / Новиков И.И., Ермишин В.А. — М. Наука, 2004. — 328 с.
- [3] **Lasar, J.** Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing / J. Lasar, M. Hola, O. Cip. In: Conference PhotoMechanics. Book of abstracts — Delft: Delft University, 2015. — P. 64.
- [4] **Хауф, В.** Оптические методы в теплопередаче / Хауф В., Григуль У. — М.: Мир, 1973. — 240 с.
- [5] **Vladimirov, A. P.** Speckle metrology of dynamic macro- and micro-processes in deformable media. Optical Engineering. — 2016. — V. 55 — No. 12 — P. 121727; 1-10. DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727
- [6] **Владимиров, А. П.** Спекл-диагностика необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и технических объектах / Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Михайленко Ю.А. // Оптические методы исследования потоков: Под ред. Дубнищева Ю. Н., Скорняковой Н. М. Труды XVI Международной научно-технической конференции, 28 июня – 02 июля 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. — С. 51- 62. [Электронное издание]

- [7] **Vladimirov, A. P.** Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments // AIP Conference Proceedings. — 2016. — V. 1740. — P. 040004. DOI: 10-1063/14962663
- [8] **Владимиров, А. П.** К спекл-томографии функций живой клетки // Изв. вузов. Радиофизика. — 2020. — Т. 63. — № 8. — С. 655–664.
- [9] **Vladimirov, A. P.** Theory and calibration of speckle dynamics of phase object // SPIE Conference Proceeding. — 2012. — Vol. 8337. — P. 83370C-1–15.
- [10] **Владимиров, А. П.** Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами / Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Акашев Л.А., Дружинин А.В. // Оптика и спектроскопия. — 2019. Т. — 127. — В. 5. — С. 870-880.
- [11] **Vladimirov, A. P.** Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel / Vladimirov A. P. Drukarenko N. A., Myznov K. E. // Technical Physics Letters. — 2021. — V. 47. — No. 8. — P. 773–776.
- [12] **Ботвина, Л. Р.** Кинетика разрушения конструкционных материалов. Учебник. — М.: Наука, 1989. — 230 с.
- [13] **Vladimirov, A. P.** Dynamic speckle – interferometry of micro-displacements // AIP Conference Proceedings. — 2012. — V. 1457. P. 459 – 468.
- [14] **Vladimirov, A. P.** Real-time study of high-cycle fatigue damage using the averaged speckle dynamics / Drukarenko N.A., Kamantsev I.S., Trishin V.N., Lukin N.A. // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 1149.— P. 012013 (1-7)
- [15] **Зверьков, А. В.** Хлоргексидин: прошлое, настоящее и будущее одного из основных антисептиков / Зверьков А.В., Зузова А.П. // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. — 2013. — Том 15. — № 4. — С. 280.

## Prospects for the application of speckle photonics of processes occurring in living and inanimate matter

*A. P. Vladimirov*

E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yekaterinburg, Russia

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Yekaterinburg Research Institute of Viral Infections of the Federal State Medical Center "Vector" of  
Rosпотребнадзор, Yekaterinburg, Russia

The theory, experimental substantiation and prospects of using the method of time-averaged speckle images for quantitative analysis of irreversible and reversible processes occurring in a number of living and inanimate objects are considered. Prospects for the creation and application of: optical and non-optical sensors of a new generation of matrix type for non-destructive testing of parts and structural elements operated under conditions of high-cycle fatigue are discussed; speckle tomographs of the functions of a living cell and turbulent flows, allowing real-time layer-by-layer monitoring of processes in areas of the order of 1 microns in size; methods for numerical calculation of the stress-strain state of parts at the stage of nucleation, start and crack movement; methods for estimating the residual life of structural elements.

*Keywords:* Photonics, Speckle, Image, Living cells, High-cycle fatigue, Turbulence, Tomography, Real time.

# Усовершенствование устройства диагностики неисправностей высоковольтного оборудования

А. В. Лукин<sup>1</sup>, А. Н. Мельников<sup>1</sup>, Н. К. Павлычева<sup>2</sup>, А. Н. Чеплаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> О «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В докладе предложена усовершенствованная оптическая схема устройства дистанционной диагностики неисправностей высоковольтного оборудования, работающего в 3-х оптических диапазонах. Моделирование и оптимизация параметров зеркального объектива типа Кассегрен и пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решетки из флюорита проводились при помощи программного обеспечения «OpticStudio Zemax». Даны оптические параметры оптимизированной оптической схемы и их сравнение с исходными.

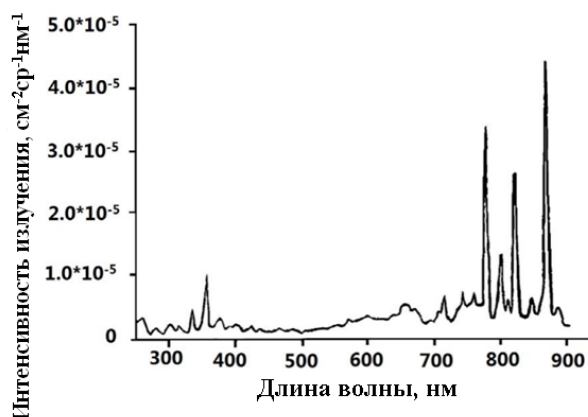
*Ключевые слова:* Коронный разряд, Устройство диагностики, Оптическая схема, Зеркальный объектив, Дифракционная решетка, Оптимизация оптических параметров.

*Цитирование:* Лукин, А. В. Усовершенствование устройства диагностики неисправностей высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 430–434.

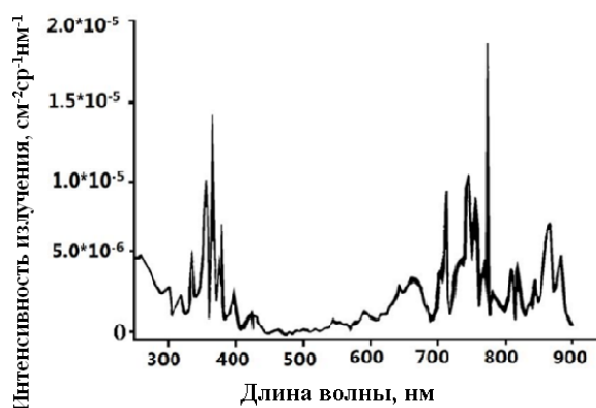
Количество эксплуатируемого высоковольтного оборудования (ВВО) и линий электропередач (ЛЭП) ежегодно растет, и чтобы обеспечить его своевременной диагностикой для предотвращения аварийных ситуаций, используют специальные устройства. Портативное устройство диагностики неисправностей высоковольтного оборудования ранее было предложено в [1, 2] и усовершенствовано в [3, 4]. Цель данной работы — увеличение спектрального разрешения устройства и дисперсии рассчитываемой пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решетки (ПВГДР).

Излучение коронного разряда на поверхности изоляционных конструкций ВВО и ЛЭП имеет характерный спектр в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах (рис. 1). На рис.1 видно, что основное излучение сконцентрировано в УФ диапазоне длин волн 250 – 400 нм и ближнем ИК диапазоне длин волн 700 – 900 нм, и оно становится интенсивнее при увеличении напряжения ВВО и ЛЭП [5]. Часть спектра коронного разряда перекрывается сильным УФ солнечным излучением в спектральном диапазоне с длинами волн более 325 нм. Поэтому оптимальным диапазоном для исследования спектра коронного разряда в дневное и ночное время суток являются 250 – 325 и 250 – 400 нм.

Для исследования спектра в измерительном канале устройства (в УФ диапазоне спектра) предлагается использовать многоканальное матричное фотоприемное устройство (ФПУ) с размерами пикселя  $24 \times 24$  мкм и их числом  $512 \times 4$ . ФПУ должен обеспечивать широкий рабочий спектральный диапазон от 200 до 1200 нм и приемную площадку размерами  $12,288 \times 0,096$  мм [6].



а) при напряжении ЛЭП  $U = 6$  кВ,  
диаметр провода  $d = 2,5$  мм



б) при напряжении  $U = 9$  кВ,  
диаметр провода  $d = 2,5$  мм

**Рис. 1.** Спектр излучения коронного разряда [5]

Наблюдательные каналы устройства с рабочими видимым и ИК диапазонами спектра должны быть оснащены соответственно фильтрами и матричными ФПУ, включая полосовые оптические фильтры ИК диапазона спектра толщиной 1 мм, выполненные из монокристаллического оптического германия, которые являются прозрачными в областях спектра 3–5 или 8–9 мкм [7].

Ранее для разрабатываемого устройства было предложено три варианта зеркального объектива типа Кассегрен [3]. С целью увеличения спектрального разрешения, получаемого в УФ диапазоне спектра, было решено провести оптимизацию оптических параметров зеркального объектива и ПВГДР.

**Таблица 1.** Параметры вариантов объектива типа Кассегрен

№ вар.	$f$ , мм	$D_1/D_2$ , мм	Относительное отверстие	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$d$ , мм	$k_1$	$k_2$	Площадь рабочей поверхности, мм <sup>2</sup>
1	220	40/14	1:5,6	100	46,081	32	-0,078	3,215	1218
2	261	60/20	1:4,4	80	28	28	-0,851	-1,000	2748
3	185	80/34	1:2,4	80	34	24	-0,838	-1,519	4800

В таблице 1 приняты следующие обозначения:  $f$  – фокусное расстояние объектива,  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры апертур главного и вторичного зеркал соответственно,  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы кривизны вершинных сфер главного и вторичного зеркал соответственно,  $d$  – расстояние между зеркалами,  $k_1$  и  $k_2$  – конические постоянные главного и вторичного зеркал соответственно.

Для оптимизированных вариантов объектива типа Кассегрен были рассчитаны ПВГДР с переменным шагом, их параметры указаны в таблице 2.



**Таблица 2.** Параметры вариантов ПВГДР с переменным шагом

№ вар. по таблице 1	Пространственная частота в центре, штр./мм	Дисперсия, нм/мм	Радиус пятна рассеяния, мкм
1	650	40	4,5
2	650	40	5,0
3	650	50	12,0

В таблице 3 приведены результаты численного моделирования, полученные при помощи программного обеспечения «OpticStudio Zemax», – значения радиусов пятен рассеяния для видимого и ИК диапазонов спектра, в которых сконцентрировано 80 % энергии.

**Таблица 3.** Результаты моделирования

№ варианта	Средняя длина волны, мкм			
	0,275	0,546	4,0	8,5
	Радиус пятна рассеяния, мкм			
1	4,5	6,0	40,0	90,0
2	5,0	5,0	31,0	67,0
3	12,0	6,0	18,0	39,0

В данной оптической схеме подложка ПВГДР представляет собой мениск с наибольшим световым диаметром 21 мм из флюорита (фтористого кальция)  $\text{CaF}_2$  толщиной 1 мм по оптической оси [8]. Рельефно-фазовая дифракционная структура этой решетки изготавливается в два этапа. На первом этапе применяется классическая голографическая технология, в рамках которой с помощью двулучевого интерферометра в слое фоторезистора регистрируется интерференционная картина с последующей ее химической обработкой. Таким образом, формируется необходимая маска с заданной пространственной частотой. На втором этапе через полученную маску рельефно-фазовую дифракционную структуру переносят на поверхность подложки с помощью ионного травления. Данный технологический процесс может обеспечить получение дифракционной эффективности этой решетки в заданном УФ диапазоне спектра в первом порядке дифракции практически не менее 20 % от величины падающего в этом диапазоне потока излучения, при этом процесс характеризуется высокой воспроизводимостью основных оптических параметров изготавливаемых решеток.

Результаты моделирования в программе «OpticStudio Zemax» (таблица 3) показывают, что вариант объектива № 3 (по таблице 1) даёт лучшее качество изображения для наблюдательной ветви: для видимого диапазона спектра радиус пятна рассеяния равен 6,0 мкм, для среднего ИК диапазона спектра – 18,0 мкм и для дальнего ИК диапазона спектра – 39,0 мкм. Оптимизированная оптическая система с ПВГДР дает спектральное разрешение, равное 12,0 мкм в УФ диапазоне спектра для измерительной ветви, при этом по теореме Котельникова–Найквиста этого достаточно для выбранного ФПУ с размерами пикселя  $24 \times 24$  мкм.

В результате выполненной работы был рассчитан вариант зеркального объектива типа Кассегрен, в котором по сравнению с вариантами, представленными в [3], были уменьшены значения радиусов пятен рассеяния в среднем ИК диапазоне спектра с 26,0 до 18,0 мкм и в дальнем ИК диапазоне спектра с 46,0 до 39,0 мкм при незначительном его увеличении в видимом диапазоне спектра с 3,4 до 6,0 мкм, что несильно снизит оптическое качество изображения наблюдаемых объектов. Для выделения излучения УФ диапазона спектра была использована ПВДР, которая позволила уменьшить радиус пятна рассеяния с 800,0 до 12,0 мкм, что сопоставимо с размерами пикселя представленных на рынке ФПУ матричного типа.

### Список источников

- [1] Патент № 2737516 РФ. Устройство обнаружения и измерения электрического разряда высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников — Заяв. 09.01.2020. — Опубл. 01.12.2020.
- [2] Лукин, А. В. Трехдиапазонная оптическая система для устройства обнаружения электрического разряда высоковольтного оборудования / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. — 2021. — № 1. — С. 109–117.
- [3] Лукин, А. В. Зеркальный объектив для переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда в высоковольтном промышленном оборудовании и электрических сетях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Н. Чеплаков // HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. — С. 219–222.
- [4] Лукин, А. В. Устройство обнаружения электрического разряда с возможностью исследования спектра в ультрафиолетовом диапазоне / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. К. Павлычева, А. Н. Чеплаков // XI международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научных трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. — С. 543–544.
- [5] Liu, S. Research on ultraviolet detection of insulator corona discharge / S. Liu // 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, — 2014. — P. 1347–1352, DOI: 10.1109/ICMA.2014.6885895.
- [6] High-speed operation, back-thinned FFT-CCD / URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/image-sensor/ccd-cmos-nmos-image-sensor/line-sensor/for-scientific-measurement/S9037-0902.html>
- [7] РТМ 3–1640–83. Кристаллы германия оптические. Физико-химические свойства. — М.: ЦНИИ «Комплекс», 1983. — С. 14.
- [8] ОСТ 3–6304–87. Кристаллы фтористого кальция оптические. Технические условия. — М.: ЦНИИ «Комплекс», 1987. — С. 22.

# Improving the device for diagnosing faults in high-voltage equipment

*A. V. Lukin<sup>1</sup>, A. N. Melnikov<sup>1</sup>, N. K. Pavlycheva<sup>2</sup>, A. N. Cheplakov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

The report proposes an improved optical scheme for a device for remote diagnostics of faults in high-voltage equipment operating in 3 optical bands. Modeling and optimization of the parameters of a Cassegrain-type mirror lens and a transmissive concave fluorite hologram diffraction grating were carried out using the OpticStudio Zemax software. The optical parameters of the optimized optical scheme and their comparison with the original ones are provided in the report.

*Keywords:* Corona discharge, Diagnostic device, Optical scheme, Mirror lens, Diffraction grating, Optimization of optical parameters.

# Станок новой конструкции для двухстороннего полирования оптических плоско-параллельных пластин прямоугольной формы

*Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, Н. Н. Дубовик, А. С. Кузнецов*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Разработана методика полирования поверхности деталей, которые являются волноводами в оптических системах дополненной реальности. Из данной методики следует, что операцию шлифовки указанного класса прецизионных деталей следует производить групповым методом на станке для двухсторонней доводки, а операцию полирования – на разработанном станке новой конструкции индивидуального двухстороннего полирования. При этом после двухсторонней групповой шлифовки детали приобретают погрешность формы в виде двойкой выпуклости, а на операции двухстороннего индивидуального полирования за счёт применения расчётной наладки станка, обеспечивается возникновение отклонений от плоскостности полируемых поверхностей в виде вогнутости. Это позволяет на операции полирования компенсировать погрешности формы, возникшие при выполнении последней операции шлифовки.

*Ключевые слова:* Формообразование оптических поверхностей, Оптические плоско-параллельные пластины, Двухстороннее полирование, Отклонения формы, Выпуклость, Вогнутость, Компенсация отклонений формы.

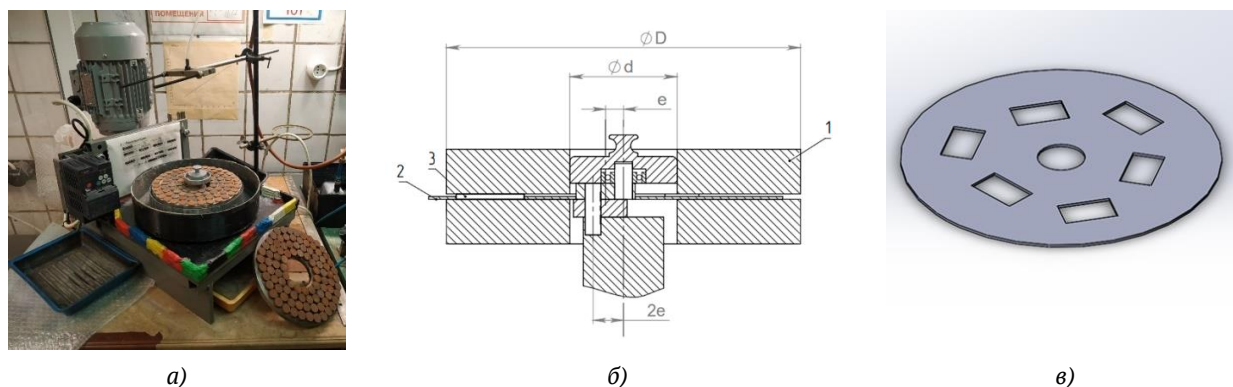
*Цитирование:* Сагателян, Г. Р. Станок новой конструкции для двухстороннего полирования оптических плоско-параллельных пластин прямоугольной формы / Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, Н. Н. Дубовик, А. С. Кузнецов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 435–440.

В настоящее время всё большее распространение получают системы дополненной реальности, включающие очки специальной конструкции. Ключевой деталью таких очков являются оптические волноводы, которые предназначены для передачи как знаково-символьной информации, так и видеоизображений [1]. Оптические волноводы представляют собой плоскопараллельные пластины, к рабочим поверхностям которых предъявляются исключительно высокие требования по отклонениям от плоско-параллельности, которые должны находиться в пределах до 1 мкм на каждые 100 мм длины оптического пути лучей, несущих информацию о передаваемом изображении.

Обеспечение указанного требования методами традиционной оптической технологии, предусматривающей достижение требуемой плоскостности функциональных поверхностей поочерёдно, применяя перенаклеивание заготовки, представляется проблематичным, поскольку в это случае неизбежно возникают погрешности установки, связанные с неравномерностью толщины клеевого слоя, которая, в свою очередь, обусловлена неравномерностью нагрузки, прикладываемой как при наклеивании, так и при обработке, неомогенностью клеевого состава и т.п. Наиболее перспективным методом обеспечения

требуемой плоскопараллельности деталей в форме нежёстких оптических плоскопараллельных пластин представляется двухсторонняя доводка. Станки для двухсторонней доводки планетарного типа внедрены и применяются на НПО «Геофизика-Космос» в условиях серийного производства [2].

Существующие конструкции станков планетарного типа отличаются крупногабаритностью, что в условиях установившегося массового или серийного производства является их достоинством, однако в условиях единичного производства при проведении НИР и ОКР применение таких станков вряд ли целесообразно. Кроме того, конструкции таких станков не предусматривают разгрузку сепаратора, что может приводить к разрушению тонких пластин из хрупких материалов. В МГТУ им. Н.Э. Баумана для экспериментальных исследований возможностей технологических операций двухсторонней шлифовки и полирования образцов из оптического стекла разработан и изготовлен настольный станок эксцентрикового типа. (Рис. 1).



**Рис. 1.** Внешний вид (а), схема (б) и конструкция сепаратора (в) настольного станка для групповой двухсторонней доводки эксцентрикового типа

Предусмотрена возможность применять как чугунные притиры, так и притиры на основе таблетированного инструмента. Также применяются как полировальники из вспененного полиуретана различной жесткости, так и смоляные полировальники. Сепаратор с заготовками помещается на нижний притир, а верхний притир вращается за счёт сил трения от деталей, находящихся в гнездах сепаратора, установленного с эксцентриситетом, относительно как верхнего, так и нижнего притиров. Такая схема обеспечивает разгрузку сепаратора, который может быть изготовлен с помощью 3D принтера, а также вырезанием из стеклотекстолита марки FR-4 [3], [4].

Станок предназначен для доводки как круглых, так и прямоугольных деталей или деталей более сложной конфигурации. В последнем случае в сепараторе могут быть выполнены отверстия соответствующей формы (см. рис. 1, в). Кроме ого может быть применена схема доводки «сепаратор в сепараторе», когда деталь произвольной конфигурации устанавливается в круглый сепаратор с отверстием в форме детали, который, в свою очередь, устанавливается в круглое отверстие основного сепаратора (рис. 2, а, б).

Конструкция «сепаратор в сепараторе» позволяет прямоугольным деталям проворачиваться вокруг собственной оси в процессе обработки. Этой же цели достигает и применение сепаратора с отверстиями сложной конфигурации. В частности, для доводки прямоугольных деталей формы рекомендуется применение отверстий в форме неправильных шестиугольников (см. рис. 2, в). Такая конструкция защищена патентом РФ [5].

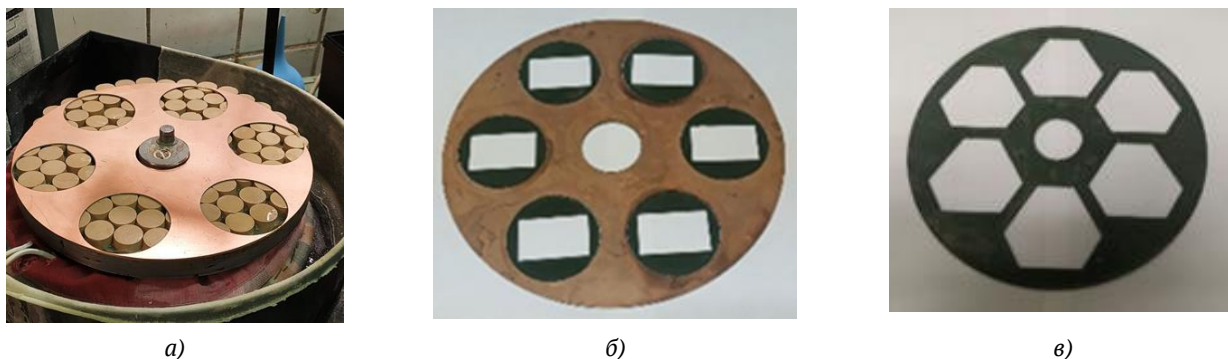


Рис. 2. Основной сепаратор (а), конструкция «сепаратор в сепараторе» (б) и сепаратор с отверстиями сложной формы применительно к доводке прямоугольных деталей

Однако экспериментальные исследования, проводимые как на планетарных и на эксцентриковых станках для двухсторонней доводки, показывают, что обработанные детали имеют систематическую погрешность формы – выпуклость – на обеих доведённых плоскостях.

Для решения этой проблемы рекомендуется следующая структура технологического процесса шлифовки и полирования оптических волноводов систем дополненной реальности. Операции оптической шлифовки, т.е. доводки свободным или связанным абразивом с формированием матовой поверхности, рекомендуется производить методом групповой обработки на настольном станке двухсторонней доводки эксцентрикового типа. При этом формируется систематическая погрешность формы функциональных плоских поверхностей в виде выпуклости. Целью этого этапа технологического процесса является технологическое обеспечение отклонений от плоско-параллельности, которые могут быть устранены за счёт формирования компенсирующей систематической погрешности на этапе полирования, т.е. при получении оптической прозрачности функциональных поверхностей.

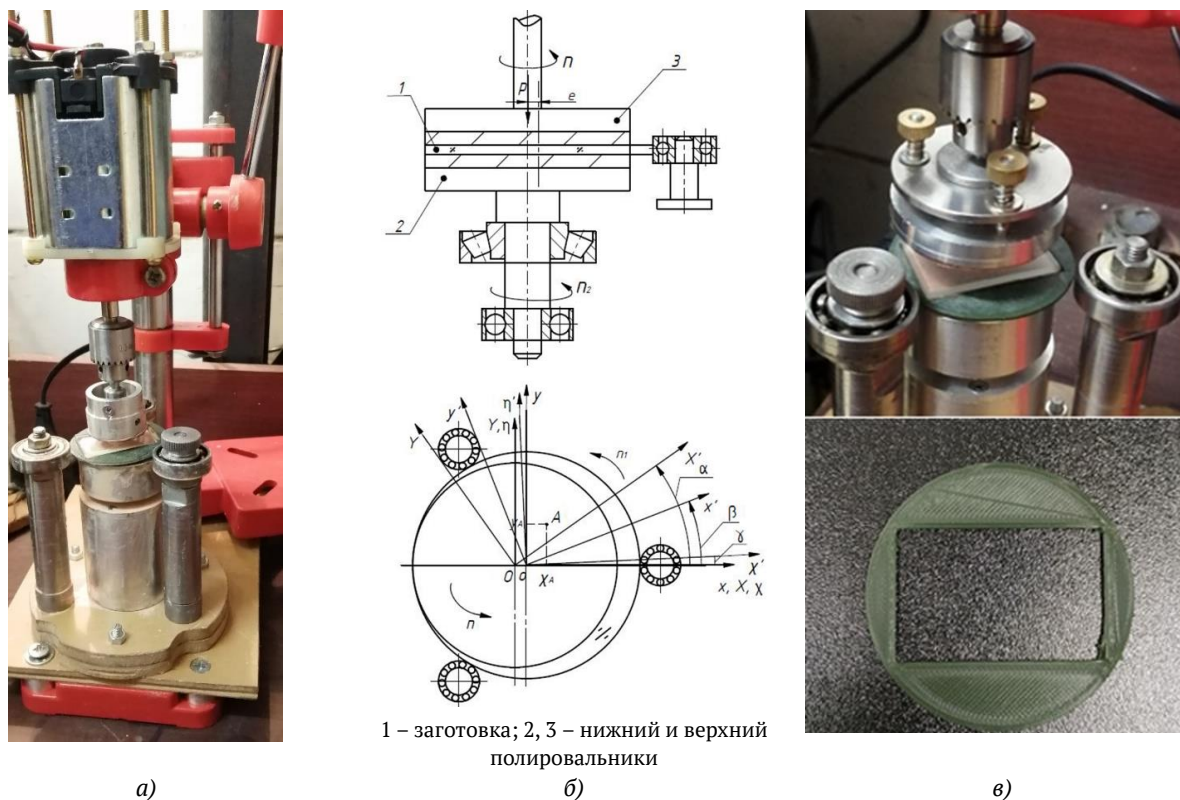
Вогнутость как систематическая погрешность формы может быть технологически обеспечена применением метода индивидуальной двухсторонней доводки на станке эксцентрикового типа. При этом должны применяться полировальники относительно малого диаметра – сопоставимого с размером обрабатываемой заготовки.

Станок, предназначенный для двухстороннего полирования деталей диаметром 50 мм или деталей прямоугольной формы, вписывающихся в этот размер при использовании сепаратора, собран на основе применения миниатюрного настольного вертикально-сверлильного станка (рис. 3).

Верхний полировальник размещён на плоской торцевой поверхности грибовидной оправки, цилиндрическая часть которой устанавливается в патроне на шпинделе сверлильного или координатно-расточного станка. Этот полировальник является ведущим звеном в кинематической схеме обработки. Заготовка укладывается на нижний полировальник, который закреплён на фланце вала дополнительно изготовленного подшипникового узла. Таким образом заготовка при обработке располагается между нижним и верхним полировальниками, установленными соосно. При этом ось вращения заготовки смещена на величину задаваемого эксцентриситета относительно общей оси вращения верхнего и нижнего полировальников. Базирование заготовки, предотвращающее её смещение в собственной плоскости, заключается в применении системы из трёх подшипников качения. Несущие эти подшипники колонны закреплены на платформе, перемещением которой устанавливают задаваемую величину эксцентриситета  $e$ .

Единственное движение в схеме обработки, а именно вращение, сообщается верхнему полировальнику. Нижний полировальник имеет возможность свободного вращения в подшипниках качения. Верхний полировальник, вращаясь с частотой  $n$ , прижимается к заготовке с усилием  $P$ . Под действием возникающих сил трения заготовка совершает вращение вокруг своей оси. Поскольку ось вращения заготовки смещена на величину эксцентриситета  $e$  относительно общей оси вращения верхнего полировальника, точки её верхней поверхности перемещаются по рабочей поверхности верхнего полировальника по циклоидальным траекториям, что и обеспечивает механическое полирование.

Аналогично, благодаря наличию трения между нижней поверхностью заготовки и нижним полировальником, последний также приводится во вращение относительно смещённой на величину эксцентриситета оси. В относительном движении точки нижней поверхности заготовки также перемещаются по нижнему полировальнику по циклоидальным траекториям. Вследствие наличия усилия прижима происходит споллирование стекла с верхней и нижней поверхностей заготовки.



**Рис. 3.** Предлагаемый станок новой конструкции для индивидуального двухстороннего полирования круглых и имеющих сложную форму оптических деталей: а) внешний вид; б) расчётная схема формообразования оптических поверхностей; в) применяемая конструкция сепаратора

Образующаяся форма обработанных поверхностей детали зависит от сочетания геометрических и кинематических факторов процесса.

Управляя этими факторами, а именно размерами полировальников и величиной эксцентриситета, добиваются преимущественного съёма обрабатываемого материала в центральной области заготовки по сравнению со съёмом материала по её периферии, формируя на обработанных поверхностях детали вогнутость. Процесс полирования должен быть остановлен при достижении величиной вогнутости значения, которое сформировалось по результатам выполнения операций шлифовки на предыдущем этапе. При этом глубина полирования не должна быть меньше глубины трещиноватого слоя шлифованных поверхностей.

Таким образом показано, что минимизация отклонений от плоско-параллельности оптических функциональных поверхностей волноводов систем дополненной реальности возможна применением двухсторонней доводки на станках эксцентрикового типа.

При этом операции двухсторонней шлифовки следует производить на станках для групповой обработки с формированием отклонений от плоскостности в форме выпуклости, величина которой не должна существенно превосходить глубину трещиноватого слоя, с обеспечением минимальности последней.



Полирование заготовок следует производить методом индивидуальной обработки на станке предложенной конструкции с применением того сочетания величины эксцентриситета и размеров полировальников, которое обеспечивает вогнутую форму отклонений от плоскостности функциональных поверхностей. Для достижения эффекта исправления погрешностей формы, сформировавшихся на операции шлифовки, необходимо соответствие минимальной глубины полирования глубине трещиноватого слоя заготовки.

### Список источников

- [1] **Yan, Z.** Virtual display design using waveguide hologram in conical mounting configuration / Z. Yan, W. Li, Y. Zhou, M. Kang // *Optical Engineering*. – 2011. – Vol. 50(9). – DOI:094001.
- [2] **Кондратенко В.С.** Двухстороннее шлифование оптических деталей связанным алмазно-абразивным инструментом / В.С. Кондратенко, Г.Р. Сагателян, А.В. Бобков // *РНТК ФТИ* – 2020. – С. 38 – 43.
- [3] **Сагателян, Г. Р.** Новый станок эксцентрикового типа для двухсторонней доводки оптических плоскопараллельных пластин / Г. Р. Сагателян, А.В. Бобков, Н. Н. Дубовик // *Сборник докладов конференции Российской научно-технической конференции с международным участием «Оптические технологии, материалы и системы»*. М.: РТУ МИРЭА. – 2020. – С. 80 – 87.
- [4] **Сагателян, Г. Р.** Особенности двухсторонней обработки оптических плоскопараллельных пластин на эксцентриковом станке настольного исполнения / Г. Р. Сагателян, А. В. Бобков, Н. Н. Дубовик, Д.П. Сладков // *РНТК ФТИ-2021. Секция 9*. – М.: РТУ МИРЭА. – С. 48 – 51.
- [5] **Дубовик Н.Н.** Сепаратор плоских пластин прямоугольной формы для их двухсторонней обработки на плоскопроводочном станке / Н.Н. Дубовик, Г.Р. Сагателян Патент РФ № 205 870. В24В 37/04. Бюл. № 23 от 11.08.2021.

## A new design machine for double-sided polishing of optical plane-parallel rectangular plates

*G. R. Sagatelian, E. R. Piskunova, N. N. Dubovik, A. S. Kuznetsov*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

A technique for polishing the surfaces of parts that are waveguides in optical augmented reality systems has been developed. It follows from the above methodology that the grinding operation of the specified class of precision parts should be performed by a group method on a machine for double-sided lapping, and the polishing operation - on a developed machine new design for individual double-sided polishing. This is due to the fact that after two-sided group lapping, the parts acquire a shape error as a double convexity, and during the operation of two-sided individual polishing using the calculated adjustment of the machine, deviations from the flatness of the polished surfaces are ensured to be concavity. This allows the polishing operation to compensate the shape errors that occurred during the last optical grinding operation.

*Keywords:* Shaping of optical surfaces, Optical plane-parallel plates, Double-sided polishing, Shape deviations, Convexity, Concavity, Compensation of shape deviations.

# Матрицы гармонических линз как дисперсионный элемент гиперспектрометра на основе цветной светочувствительной матрицы

*Р. В. Скиданов, В. А. Бланк, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипов, Н. А. Ивлиев*

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН, Самара, Россия  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва,  
Самара, Россия

Рассмотрена мультиапертурная система из гармонических линз разной высоты. Показано что использование такой системы позволяет эффективно формировать утроенное количество спектральных каналов, по сравнению с обычной мультиапертурной системой за счет использования цветной матрицы приведены результаты натурального эксперимента.

*Ключевые слова:* Гармоническая линза, Мультиапертурная система, Гиперспектрометр.

*Цитирование:* **Скиданов, Р. В.** Матрицы гармонических линз как дисперсионный элемент гиперспектрометра на основе цветной светочувствительной матрицы / Р. В. Скиданов, В. А. Бланк, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипов, Н. А. Ивлиев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 441–445.

## Введение

До недавнего времени коммерческие системы изображающей спектроскопии были в основном бортовыми устройствами для космических и летательных аппаратов, которые сложно было использовать на поверхности Земли [1].

В большинстве современных изображающих спектрометров оптическая система, формирующая изображение, и дисперсионный элемент чётко разделены. В качестве дисперсионного элемента в изображающем спектрометре может использоваться как призма, так и дифракционная решётка. При этом спектральное разрешение таких приборов всегда на один два порядка хуже, чем разрешение обычных спектрометров. Связано это, в первую очередь с тем, что в изображающих гиперспектрометрах используются существенно более низкочастотные дисперсионные элементы. Так если число линий на миллиметр в дифракционной решётке обычного спектрометра составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч, то в изображающих гиперспектрометрах обычно используются решётки, в которых не более нескольких десятков линий на миллиметр. Связано это с тем, что в изображающих гиперспектрометрах нежелательно сильно смещать изображение от оптической оси прибора, из-за уширения функции рассеяния точки. Это уширение можно нивелировать за счет использования дифракционных решёток на криволинейных поверхностях, [2]. Но это ведет к необходимости использования дифракционных решёток на криволинейных поверхностях, изготовление которых затруднено по сравнению с плоскими дифракционными решётками. В последнее время наметилась тенденция к разработке

относительно простых по конструкции гиперспектрометров для использования на беспилотных летательных аппаратах, на вращающихся платформах, оптические схемы таких спектрометров представляют собой телескопическую систему с дисперсионным элементом в фокальной плоскости [3–2]. Но, безусловно, самым простым вариантом является использование мультиапертурных систем в сочетании со спектральными фильтрами [6]. В настоящей работе рассматривается мультиапертурная система на основе гармонических линз и цветной светочувствительной матрицы.

### 1. Расчет элемента на основе матрицы гармонических линз

Согласно [7] для гармонической линзы рассчитанной для работы с длиной волны  $\lambda_0$  возникает набор длин волн (гармоник), на которых эта линза также строит четкое изображений. Эти длины волн определяются по формуле

$$\lambda_k = \frac{m\lambda_0}{k} \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент показывающий во сколько раз, высота микрорельефа гармонической линзы больше, чем высота микрорельефа дифракционной линзы на длину волны  $\lambda_0$ . Коэффициент  $m$  можно вычислить по формуле

$$m = \frac{h \cdot (n-1)}{\lambda_0} \quad (2)$$

где  $h$  – высота микрорельефа,  $n$  – показатель преломления. Для линзы с высотой микрорельефа 6 мкм и  $\lambda_0 = 550$  нм  $m = 5$ , согласно (1) у этой линзы есть еще две гармоники, которые попадают в видимый диапазон,  $\lambda_4 = 687$  нм,  $\lambda_6 = 458$  нм. Таким образом, естественным путем получается три спектральных канала, один из них регистрируется синими пикселями, один – зелеными, и один – красными. Для получения большего количества каналов нужно использовать мультиапертурную систему, в которой гармонические линзы имеют разную высоту микрорельефа. Поскольку 6мкм является практически предельной высотой для используемой технологии прямой лазерной записи, то высоту микрорельефа придется уменьшать. Если рассматривать простейшую мультиапертурную систему из 4 линз, то для обеспечения примерно равномерного расположения спектральных каналов надо подобрать высоты исходя из пересечения длиной волны  $\lambda_6$  границы видимого диапазона. Расчет по формулам (1) и (2) дает значение высоты микрорельефа 5,22мкм ( $\lambda_0 = 480$  нм, гармоника  $\lambda_4 = 600$  нм). Оставшиеся две линзы формируем с высотами 5,48мкм ( $\lambda_0 = 500$  нм, гармоника  $\lambda_4 = 625$  нм, гармоника  $\lambda_6 = 417$  нм) и 5,74 мкм ( $\lambda_0 = 528$ нм, гармоника  $\lambda_4 = 660$  нм, гармоника  $\lambda_6 = 440$  нм). Полный набор центральных длин волн спектральных каналов приведен в таблице 1.

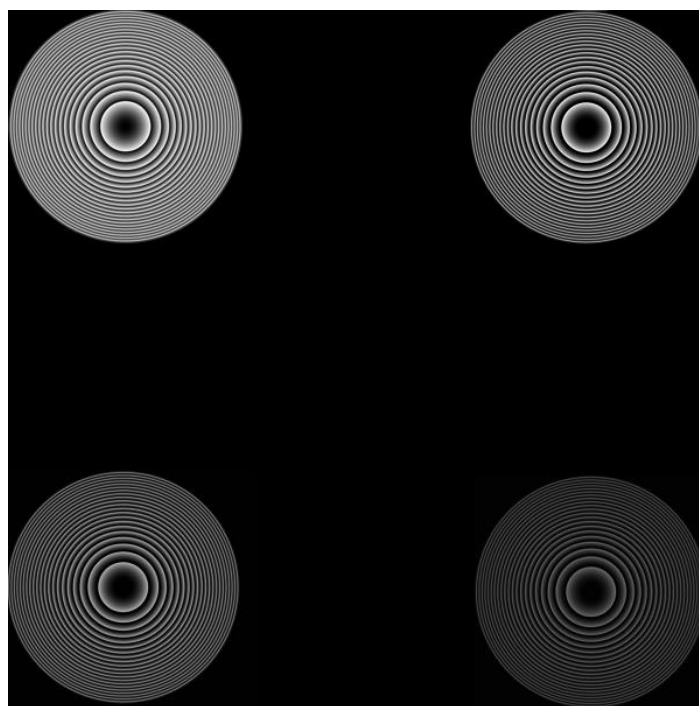
**Таблица 1.** Центральные длины волн

Номер канала	Центральная длина волны (нм)	Ширина спектрального канала (нм)
1	400	17
2	417	23
3	440	18
4	458	22
5	480	20
6	500	28
7	528	22
8	550	50
9	600	25
10	625	35
11	660	27
12	687	13

Как видно из таблицы 1 получилось 12 спектральных каналов расположенных почти равномерно с закономерным разрывом между 550нм и 600нм. Этот разрыв можно при большем количестве линз заполнить за счет введения линз, у которых гармоника  $\lambda_6$  уйдет за границы видимого диапазона в ультрафиолетовую область.

## 2. Изготовление и эксперимент

Для обеспечения точности формирования микрорельефа гармонические линзы для мультиапертурной системы формируются на одной подложке. На рис. 1 представлена фазовая функция четырехлинзовой системы. Размер всей области записи 6,5\*6,5мм, диаметр апертуры линз 2мм.



**Рис. 1.** Фазовая функция четырехлинзовой системы

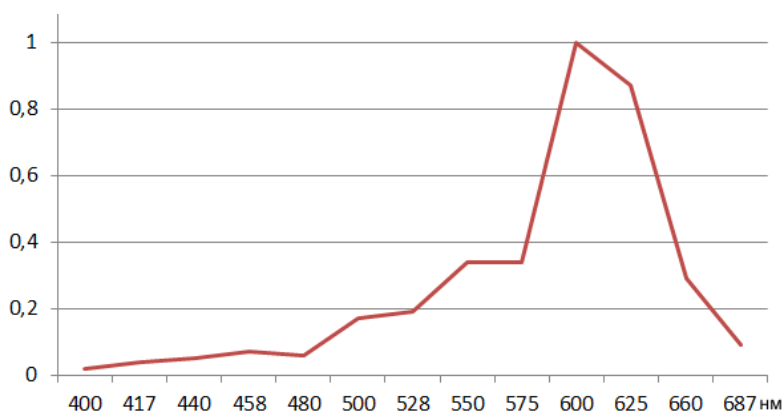
Мультиапертурная система была изготовлена на резисте методом прямой лазерной записи. Для эксперимента использовалась цветная камера Basler acA 1920-40uc.

К сожалению, одновременная съемка всеми четырьмя линзами требует ввода в оптическую систему специальной бленды для разделения областей на матрице, которую пока не удалось изготовить, поэтому первый эксперимент был проведен с отдельной съемкой, для этого на мультиапертурную систему накладывалась диафрагма, которая оставляла только открытой одну из линз. На рис.2 представлены результаты первого эксперимента, в котором был снят участок светотехнической таблицы с четырьмя цветными квадратами.



**Рис. 2.** Изображения участка светотехнической таблицы, полученные в мультиапертурной системе каждой из 4 линз

Интенсивности для каждого квадрата измерялись путем разделения цветовых каналов и нормировались на кривую чувствительности каждого типа пикселей. Потом все это сводилось в спектральное распределение. На рис.3 представлен спектр красного квадрата.



**Рис. 3.** Полученное спектральное распределение для красного квадрата на рис. 2

Как видно из рис. 3 получен вполне ожидаемый результат с пиком в красной области спектра, что позволяет говорить о работоспособности рассматриваемой системы.

### Заключение

Проведенный эксперимент показывает работоспособность предложенной мультиапертурной системы. Однако надо рассматривать полученные результаты как сугубо предварительные. Для практического использования мультиапертурная система должна быть в виде матрицы, минимум, 4\*4 линзы. Кроме этого необходимы более точные данные о спектральной

чувствительности пикселей цветной матрицы. В рамках этой работы они были заданы довольно приблизительно на основе графического представления, взятого с сайта производителя. В целом же возможность формирования одной линзой сразу трех спектральных каналов позволяет получить компромиссное решение с удовлетворительным спектральным и пространственным разрешением.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021–2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области" в части расчета и при поддержке гранта РФФИ № 20-69-47110 в части эксперимента.

### Список источников

- [1] **Robles-Kelly, A.** Imaging spectroscopy for scene analysis: Challenges and opportunities / A. Robles-Kelly, B. Simpson-Young // IET Computer Vision. – 2013. – Vol. 7(6). – P. 467-477.
- [2] **Kwo, D.** Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system / D. Kwo, G. Lawrence, and M. Chrisp // Proc. SPIE. – 1987. – Vol. 818. – P. 275-279.
- [3] **Cai, F.** Pencil-like imaging spectrometer for biosamples sensing / F. Cai, D. Wang, M. Zhu, S. He // Biomedical optics express. – 2017. – Vol. 8(12). – P. 5427-5436.
- [4] **Zhang, H.** Development of a Portable Field Imaging Spectrometer: Application for the Identification of Sun-Dried and Sulfur-Fumigated Chinese Herbs / H. Zhang, T. Wu, L. Zhang, P. Zhang // Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 70(5). – P. 879-887.
- [5] **Wu, T.** Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy for Analysis of Ancient Paintings / T. Wu, G. Li, Z. Yang, H. Zhang, Y. Lei, N. Wang, L. Zhang // Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 71(5). – P. 977-987.
- [6] **Mu, T.** Compact snapshot optically replicating and remapping imaging spectrometer (ORRIS) using a focal plane continuous variable filter / T. Mu, F. Han, D. Bao, Ch. Zhang, R. Liang // Optics Letters. – 2019. – Vol. 44(5). – P. 1281-1284.
- [7] **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren, Applied Optic – 1995. – Vol. 34. P. 2469-2475.

## An array of harmonic lenses as a dispersion element of a hyperspectrometer based on a color photosensitive matrix

*R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>, V. A. Blank<sup>1,2</sup>, S. V. Ganchevskaya<sup>1,2</sup>, V. V. Podlipnov<sup>1,2</sup>, N. A. Ivliev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" of the RAS, Самара, Россия

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

We have considered a multi-aperture system of harmonic lenses of different heights. We have shown that the use of such a system makes it possible to effectively form a tripled number of spectral channels, compared with a conventional multi-aperture system due to the use of a color matrix. We have given the results of a full-scale experiment.

**Keywords:** Harmonic lens, Multi-aperture system, Hyperspectrometer.

# Расчет и изготовление согласованных микрорельефов гармонических и спектральных линз для дисперсионных элементов

*Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская*

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Рассмотрен метод согласованного расчета двух близкорасположенных микрорельефов гармонических линз (прижатые подложки), позволяющий минимизировать влияние неперпендикулярности переходных поверхностей на границах зон. Проведен вычислительный эксперимент, доказывающий работоспособность такой системы при формировании изображения.

*Ключевые слова:* Гармонические линзы, согласованный микрорельеф, технология прямой лазерной записи.

*Цитирование:* Скиданов, Р. В. Расчет и изготовление согласованных микрорельефов гармонических и спектральных линз для дисперсионных элементов / Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 446–450.

## Введение

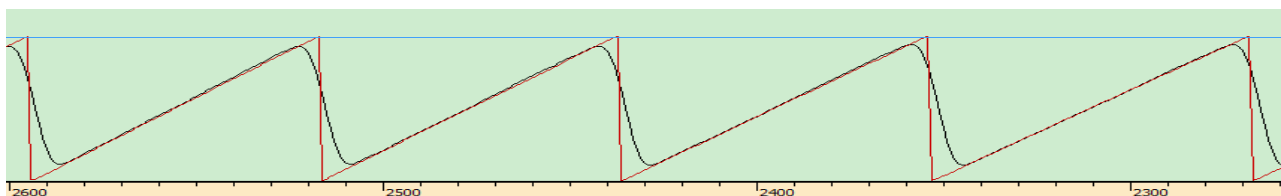
Использование дифракционных линз в изображающих системах позволяет решить множество задач: уменьшение размеров и массы объектива, снижение величины геометрических и хроматических aberrаций. Кроме этого, следует заметить, что дифракционные линзы способны аппроксимировать своими свойствами любую асферическую поверхность.

Введение в оптическую схему асферических линз один из способов получения высокого качества изображения в современных смартфонах. Поскольку толщина корпуса смартфона уже не позволяет разместить компактные объективы при нормальном расположении, в последних моделях используется конфигурации оптической системы с использованием поворотной призмы. Минимизация размеров объектива является актуальной задачей, без решения которой невозможно дальнейшее сокращение размеров таких устройств [1–8]. За счёт особой формы дифракционных асферических линз возможно уменьшить хроматизм, однако относительно высокая хроматическая aberrация таких элементов приводит к необходимости программной обработки изображений [9]. С одной стороны, дополнительная обработка изображения подходит для регистрирующих устройств в современных смартфонах, обладающих высокими вычислительными мощностями, с другой стороны, оптическое разрешение в современных смартфонах настолько высоко, что

цифровой обработки недостаточно и желательно использование объектива, сопоставимого по качеству изображения с объективами классического типа на основе большого количества рефракционных линз. Чаще, при построении мобильных оптических систем, используют гибридные системы, включающие как дифракционные, так и рефракционные элементы [10–13]. Однако гибридные системы при построении не используют все возможности дифракционных линз. В рамках данной работы рассматриваются возможности формирования распределения фазы светового поля линзой за счет использования двух близко расположенных микрорельефов гармонических линз [14].

### 1. Расчет согласованного микрорельефа

Согласованные микрорельефы линз рассчитываются исходя из условия: сумма фазовых функций в двух микрорельефах должна соответствовать фазовой функции параболической линзы. Сочетаний форм микрорельефов удовлетворяющих этому условию бесконечное количество. Оптимальная форма определялась в программе Harmony путем минимизации функции рассеяния точки на краю поля зрения и минимизации рассеянного света от участков поверхности с обратным наклоном (рис. 1). На рис. 1 показано как отличаются реальные поверхности в гармонической линзе и их отличие от расчетных при формировании микрорельефа методом прямой лазерной записи. Такого рода ошибка изготовления связана с наличием широкого конуса фокусировки и довольно сильно влияет на работу линзы с высокой числовой апертурой за счет рассеяния значительной доли света.

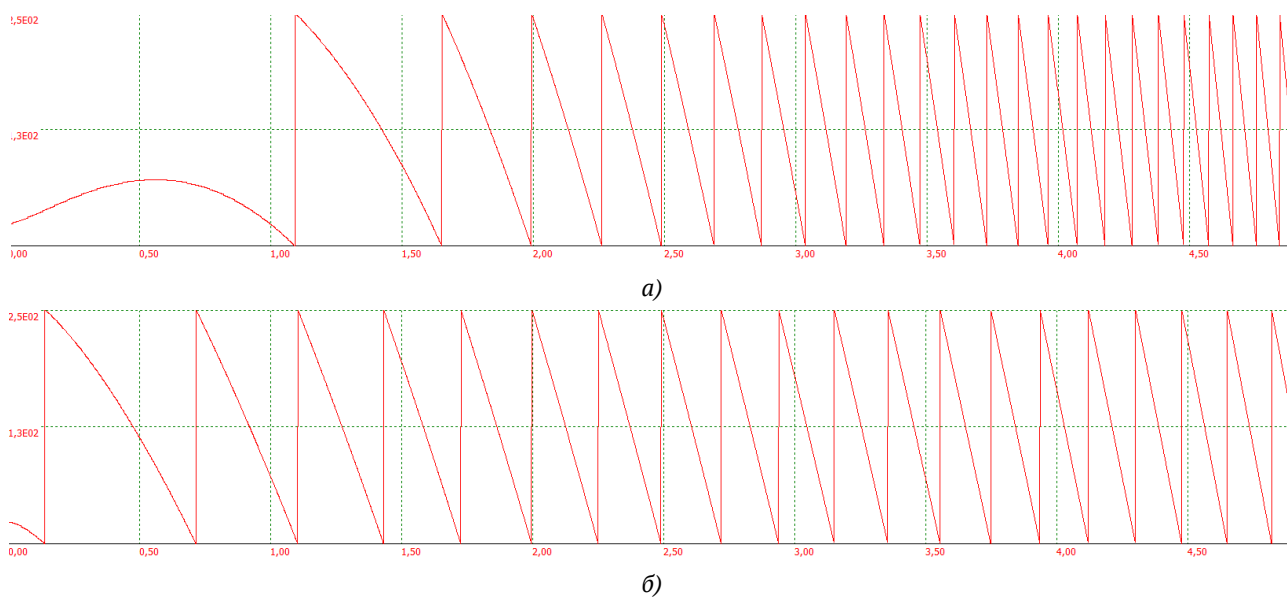


**Рис. 1.** Участок профилеграммы изготовленной линзы (плавная линия) с наложенной на нее кривой идеального профиля (ломаная линия)

В этом методе менялась форма поверхности первой гармонической линзы, а также высота от 1 мкм до 5 мкм. Вторая линза автоматически рассчитывалась так, чтобы в совокупности волна, идущая вдоль оптической оси получила фазовую добавку, такую же как от параболической линзы с высотой микрорельефа 6 мкм. Расчет велся для линзы диаметром 10 мм и фокусным расстоянием 100 мм с расстоянием между микрорельефами 100 мкм. Угол для которого велся расчет полихроматической функции рассеяния точки  $8^\circ$ .

В результате такого расчета получилось несколько десятков интересных решений в виде сочетания двух профилей микрорельефа. На рис. 2 приведено одно из таких решений.

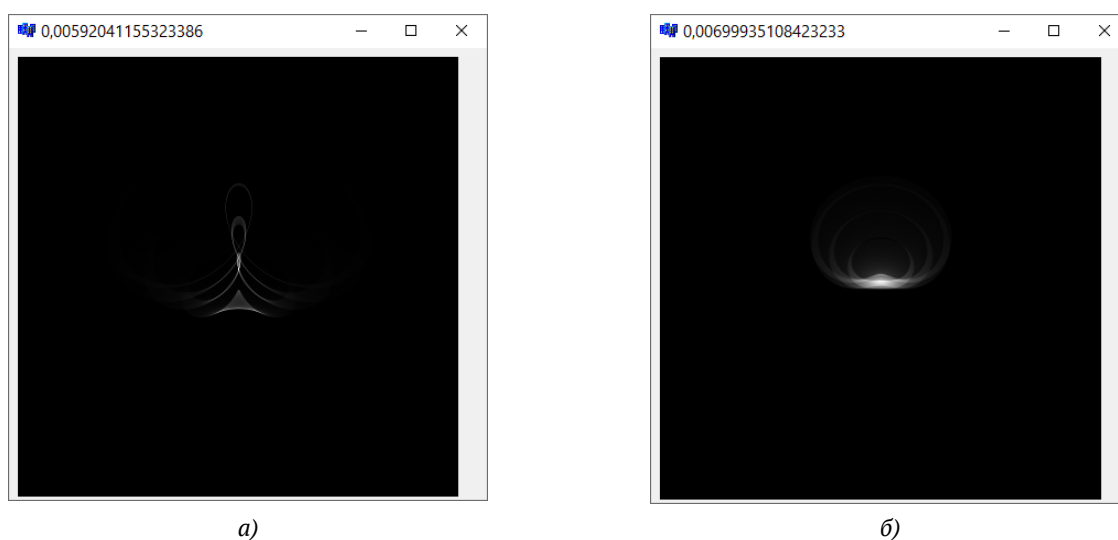




**Рис. 2.** Два профиля гармонических линз дающие минимальную ширину функции рассеяния точки под углом  $8^\circ$

## 2. Вычислительный эксперимент

В программе Harmony было проведено моделирование рассчитанной системы двух гармонических линз. Была рассчитана функция рассеяния точки для этой системы под углом  $8^\circ$  (рис. 3а) и под этим же углом была получена функция рассеяния точки для одиночной гармонической параболической линзы с высотой микрорельефа 6 мкм (рис. 3б).



**Рис. 3.** Функция рассеяния точки для системы согласованных гармонических линз в квадрате со стороной 30мкм (а), функция рассеяния точки для одиночной параболической гармонической линзы 30мкм (б)

Программа Harmony измеряет ширину функции рассеяния точки и выводит это значение в мм вверху графического окна. Для системы гармонических линз значение 6 мкм для одиночно гармонической линзы 7 мкм. Кроме этого в такой системе доля рассеянного света

от поверхностей обратного наклона составляет всего 0,09 по сравнению с 0,11 в одиночной гармонической линзе.

### Заключение

Проведенный вычислительный эксперимент показал возможность улучшения абберационных характеристик гармонической линзы при разделении ее на два микрорельефа, т.е. на две согласованные гармонические линзы. Такой подход также позволяет снизить долю рассеянного света на поверхностях обратного наклона, возникающих из-за ошибок технологического процесса.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021–2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области.

### Список источников

- [1] **Meem, M.** Versatile diffractive flat optics [Text] / M. Meem, S. Banerji, A. Majumder, C. Pies, T. Oberbiermann, B. Sensale-Rodriguez, R. Menon // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Vol. 117. – P. 041101.
- [2] **Banerji, S.** Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? [Text] / S. Banerji, M. Meem, A. Majumder, F.G. Vasquez, B. Sensale-Rodriguez, R. Menon // *Optica*. – 2019. – Vol. 6. – № 6. – P. 805.
- [3] **Park, S.** Electrically focus-tuneable ultrathin lens for high-resolution square subpixels [Text] / S. Park, G. Lee, B. Park, Y. Seo, C. Park, Y.T. Chun, C. Joo, J. Rho, J.M. Kim, J. Hone, S.Ch. Jun // *Light. Sci. Appl.* – 2020. – Vol. 5. – № 9. – P. 98.
- [4] **Lin, H.** Diffraction-limited imaging with monolayer 2D material-based ultrathin flat lenses [Text] / H. Lin, Z. Xu, G. Cao, Yu. Zhang, J. Zhou, Z. Wang, Zh. Wan, Zh. Liu, K.P. Loh, C. Qiu, Q. Bao, B. Jia // *Light. Sci. Appl.* – 2020. – Vol. 11. – № 9. – P. 137.
- [5] **Banerji, S.** Impact of fabrication errors and refractive index on multilevel diffractive lens performance / S. Banerji, J. Cooke, B. Sensale-Rodriguez // *Sci. Rep.* – 2020. – Vol. 10. – P. 14608
- [6] **Greisukh, G. I.** Limiting spectral and angular characteristics of multilayer relief-phase diffraction microstructures [Text] / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.I. Antonov, V.A. Danilov, B.A. Usievich // *Quant. Electron.* – 2020. – Vol. 50. – № 7 – P. 623-628.
- [7] **Greisukh, G. I.** Spectral and angular dependences of the efficiency of three-layer relief-phase diffraction elements of the IR range [Text] / G.I. Greiskh, V.A. Danilov, S.A. Stepanov, A.I. Antonov, B. A. Usievich // *Opt. Spectrosc.* – 2018. – Vol. 125. – № 2. – P. 232-237.
- [8] **Antonov, A. I.** Diffractive elements for imaging optical systems [Text] // A. I. Antonov, G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2017. – Vol. 53. – № 5. – P. 421-430.
- [9] **Nikonorov, A. V.** Toward ultralightweight remote sensing with harmonic lenses and convolutional neural networks / A. V. Nikonorov, M. V. Petrov, S. A. Bibikov, P. Y. Yakimov, V. V. Kutikova, Y. V. Yuzifovich, A. A. Morozov, R. V. Skidanov, N. L. Kazanskiy // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 11. – № 9. – P. 3338-3348.
- [10] **Mao, S.** Design and analysis of a hybrid optical system containing a multilayer diffractive optical element with improve diffraction efficiency [Text] / S. Mao, J. Zhao // *Appl. Opt.* – 2020. – Vol. 59. – №20. – P. 5888.

- [11] **Piao, M.** Design of achromatic annular folded lens with multilayer diffractive optics for the visible and near-IR wavebands [Text] / M. Piao, B. Zhang, K. Dong // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28. – № 20. – P. 29076.
- [12] **Choi, H.** Design of hybrid lens for compact camera module considering diffraction effect [Text] / H. Choi, Y. J. Yoon, B. Kim, S. H. Lee, W. C. Kim, N. C. Park, Y. P. Park, S. Kang [Text] // Jap. J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 47. – № 8. – P. 6678.
- [13] **Greisukh, G. I.** Correction of chromatism of dual-infrared zoom lenses [Text] / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, A.I. Antonov // Computer Optics. – 2020. – Vol. 44. – № 2. – P. 177-184.
- [14] **Sweeney, D. W.** Harmonic diffractive lenses / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // Applied Optic – 1995. – Vol. 34. P. 2469-2475.

## **Calculation and fabrication of matched microreliefs of harmonic and spectral lenses for dispersion elements**

*R. V. Skidanov, S. V. Ganchevskaya*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

We have considered a method for the coordinated calculation of two closely spaced microreliefs of harmonic lenses (pressed substrates), which allows minimizing the influence of nonverticality of transition surfaces at the boundaries of zones. We conducted a computing experiment proving the operability of such a system when forming an image.

*Keywords:* Harmonic lenses, Microrelief, Direct laser recording technology.

*Научное издание*

## HOLOEXPO 2022

XIX Международная конференция по голографии  
и прикладным оптическим технологиям

Тезисы докладов

Редактор: М. В. Шишова

Дизайн обложки: С. С. Орлов