



ГОПОГРАФИЯ, НАУКА И ПРАКТИКА

12-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ГОПОЭКСПО-2015»

12 – 15 октября 2015 г.
Казань, Россия

СБОРНИК ТРУДОВ

HOLOGRAPHY, SCIENCE AND PRACTICE

PROCEEDINGS
OF THE 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE
“HOLOEXPO’2015”

12 – 15 October 2015
Kazan, Russia



Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева

ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики»

ОАО «Казанский оптико-механический завод»

ОАО НПО «КРИПТЕН»

ООО «ХОЛОГРЭЙТ»

ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»

ФГУП «НТЦ "АТЛАС"»

ООО «РЕГУЛА»

ООО «МИКРО И НАНОГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

ГОЛОГРАФИЯ. НАУКА И ПРАКТИКА

ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ГОЛОЭКСПО-2015»

12 – 15 октября 2015 г.

г. Казань, Россия

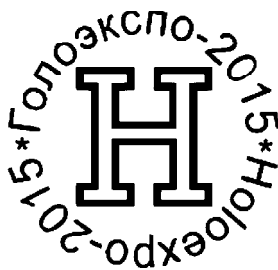
СБОРНИК ТРУДОВ

HOLOGRAPHY. SCIENCE AND PRACTICE

PROCEEDINGS OF THE 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE
“HOLOEXPO’2015”

12-15 October 2015

Kazan, Russia



Казань 2015

Г60 Голография. Наука и практика: сборник трудов 12-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2015». Казань, 12 – 15 октября 2015 года / отв. ред. М.А. Ручкина. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2015. – 396 с.

ISBN 978-5-7579-2066-5

Представлены материалы докладов: современные тенденции развития голографии и лазерной техники; технологии в области защитных голограмм; формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики и голографических систем; изобразительная голография и фоточувствительные материалы для голографии; голограммные и дифракционные оптические элементы, методы компьютерного синтеза, технология их изготовления и применение; голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации; лазерные оптико-электронные системы и приборы; лазерно-голографические измерительные методы и средства для оптической технологии и приборостроения на основе использования осевых синтезированных голограмм.

Материалы докладов охватывают практически весь спектр научных и прикладных направлений современной голографии.

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1

Редакционная комиссия:

Одинокое С.Б. – доктор технических наук, профессор
Михайлов С.А. – доктор технических наук, профессор
Белозеров А.Ф. – доктор технических наук, профессор
Лукин А.В. – доктор технических наук, профессор
Павлычева Н.К. – доктор технических наук, профессор

Конференция проводится при поддержке:

- Министерства образования и науки РФ, департамента науки и технологий;
- **ведущих университетов и научно-исследовательских институтов России:** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ; Санкт-Петербургский государственный национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; Санкт-Петербургский физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Российский университет дружбы народов; Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева; Самарский институт систем обработки изображения РАН; Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; Оптическое общество им. Д.С. Рождественского и др.;
- **ведущих научно-производственных предприятий России:** ОАО «НПО ГИПО»; ОАО «НПО «Криптен»»; ФГУП «НТЦ "Атлас"»; ЗАО «ХолоГрэйт»; ООО «Микро и наноголографические системы»; ООО «Наноточность»; ОАО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»; ОАО «Славич» и др.;
- **ведущих университетов и предприятий Республики Беларусь:** ЗАО «Голографическая индустрия»; ООО «Магия света»; ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова»; Национальная академия наук Беларуси; Белорусский государственный университет; Белорусское Оптико-механическое Объединения и др.;
- **зарубежных компаний и фирм в области голографии:** OpSec Security (Великобритания); Концерн «Демакс» (Болгария); Adl Optica Optical Systins GmbH (Германия); Process Color, Ignetta Holographis Pvt Ltd (Индия); Geola Digital LAB (Литва); Институт голографии (Греция) и др.;
- **Международной ассоциации производителей голограмм (ИМА)** в лице директора по выставкам Микаэла Сидорова (г. Лондон, Англия).

Генеральный спонсор: ОАО «Научно-производственное объединение «Криптен»» (г. Дубна, Россия).

Спонсоры конференции: ЗАО «Голографическая индустрия» (г. Минск, Республика Беларусь); ЗАО «ХолоГрэйт» (г. Санкт-Петербург, Россия); ФГУП «НТЦ "Атлас"» (г. Москва, Россия); ООО «РЕГУЛА» (г. Минск, Республика Беларусь); ООО «Микро- и наноголографические системы» (г. Москва, Россия); ОАО «НПО Государственный институт прикладной оптики» (г. Казань, Россия); ОАО «Казанский оптико-механический завод» (г. Казань, Россия).

Устроители конференции: ООО «Микро и наноголографические системы» (г. Москва, Россия); Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (г. Казань, Россия).

Информационные спонсоры: журнал «Водяной Знак» (г. Санкт-Петербург, Россия); журнал «Мир техники кино» (г. Москва, Россия); журнал «Фотоника» (г. Москва, Россия); «Оптический журнал» (г. Санкт-Петербург, Россия)

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

PLENARY SESSION

КАЗАНСКАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Белозёров А.Ф., Иванов В.П., Лукин А.В.,¹ Штырков Е.И.²

*(¹ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань*

²КФТИ КазНЦ РАН, г. Казань)

Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) был основан в 1957 году как филиал Государственного оптического института им. С.И. Вавилова. ГИПО получил самостоятельность в 1966 году. В первые годы деятельности филиала его научную тематику определяли, в основном, ученые ГОИ, поручая молодому, энергичному коллективу не только практическую реализацию своих научных идей, но и проведение исследований по новым научным направлениям. В «долазерный» период к ним можно было отнести разработку и исследование высокоинтенсивных импульсных источников света, а также средств оптической локации и связи, построенных на их основе. Для этих целей была создана оптическая лаборатория, сотрудники которой прошли многомесячную стажировку в ГОИ. В 1961-62 гг. она пополнилась способными молодыми физиками из ВУЗов Казани, Ленинграда и других городов страны [1]. Узнав о созданном в США в 1960 г. лазере на рубине, специалисты лаборатории уже в начале 1963 года получили генерацию на «рубиновой» длине волны $\lambda = 0,69$ мкм. Однако вскоре ГОИ полностью «забрал под себя» лазерную тематику, оставив 20 молодых людей без уже считавшегося «нашим» дела. В августе 1963 года лабораторию возглавил Камиль Сабирович Мустафин – высококлассный специалист в области физики плазмы и спектроскопии, незадолго до этого защитивший по этой тематике кандидатскую диссертацию в Ленинградском университете под руководством чл.-корр. АН СССР С.Э. Фриша. По инициативе К.С. Мустафина и под его руководством был поставлен ряд НИР по изучению газовых разрядов различных типов (положительный столб, полый катод, отрицательное свечение, дуговой разряд, импульсные режимы) с целью получения оптимальных условий генерации газоразрядных лазеров. В 1964 году была получена генерация в разряде He-Ne на длинах волн $\lambda = 1,15$ мкм и $\lambda = 0,63$ мкм. В 1966 году был разработан He-Ne лазер с рекордной для того времени мощностью (Г.Н. Буйнов, $\lambda = 0,63$ мкм, 60 мВт). В лаборатории были начаты исследования сенситометрических свойств высокоразрешающих галоидо-серебряных материалов (Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, А.И. Садыкова). С 1958 года в филиале ГОИ выполнялись разработки интерференционных и теневых приборов для оснащения ими аэродинамических труб и баллистических установок в лаборатории, которую возглавлял бывший ленинградец (завод ГОМЗ, эвакуированный в Казань) В.В. Барашев. В 1962 г. это научное направление (вскоре оно было передано из ГОИ в ГИПО) возглавил А.Ф. Белозеров, поступивший на работу в ГИПО в 1960 году и прошедший стажировку в ГОИ под руководством выдающегося специалиста по интерферометрии А.А. Забелина. При поступлении А.Ф. Белозерова в аспирантуру ГОИ тема его будущей диссертации касалась изучения пространственных газовых потоков. Базой для экспериментальной работы стала ВВИА им. Н.Е. Жуковского, а первым научным руководителем был начальник академии профессор С.М. Белоцерковский. В этот период А.Ф. Белозеров осознал

перспективность применения голографии для решения задач, стоящих в его диссертационной работе. Вскоре он возглавил новую лабораторию интерференционно-теневого приборостроения, в которой в 1980-х годах работали 8-10 талантливых и высококвалифицированных специалистов. Таким образом, молодой коллектив специалистов ГИПО оказался превосходно подготовленным к выполнению НИОКР по голографии. [1, 2]. Не случайно именно в ГИПО были решены первые прикладные голографические задачи: голографическая интерферометрия неоднородностей в прозрачных средах [3], решение проблемы контроля всех видов асферической оптики на основе использования синтезированных голограмм, мультиплицирование изображений для микроэлектроники при помощи голограммных линзовых растров и синхронного сканирования, голограммные оптические элементы.

Работы проводились под общим научным руководством академика Ю.Н. Денисюка. Важно, что новое направление исследований активно поддерживал директор института С.О. Мирумянц.

В 1966 году на конференции в Ереване специалисты лаборатории интерференционных приборов уже демонстрировали интерферограммы обтекания модели самолета потоком воздуха в аэродинамической сверхзвуковой трубе ВВИА. При посещении ГИПО в это же время Министр оборонной промышленности СССР С.А. Зверев был доволен: «Это вам не «пятаки» показывать». Сотрудниками лаборатории разработаны теоретические основы, принципы построения и оптимизации характеристик голографических интерферометров и теневых приборов; совместно с ЦКБ «Фотон» и КОМЗ разработаны и изготовлены десятки новых приборов с размерами наблюдаемого поля от 230 мм до 800 мм, на уровне проработок – до 1500 мм, для оснащения ими аэродинамических труб, баллистических трасс, энергоустановок, плазмотронов ведущих аэрокосмических, тепло-энергетических лабораторий и НИИ. Созданы принципиально новые оптические системы голографических интерферометров, в которых в качестве высокоточных объективов коллиматоров использованы синтезированные голограммные оптические элементы.

К великому нашему сожалению, работы по этому направлению в ГИПО с началом перестройки были прекращены, а складывающаяся ситуация приближает его к «точке невозврата».

На основе использования СГОЭ, была принципиально решена важнейшая для отрасли технологическая проблема контроля асферической оптики, результаты разработок внедрены на 5-6 оптических заводах.

Важным направлением работ ГИПО стали разработки и серийный выпуск голограммных оптических элементов (ГОЭ) – отражающих и пропускающих дифракционных решеток, голограммных линз, голограммных селективных зеркал, узкополосных фильтров (Notch-filters), светоделителей и др. Голограммные решетки полностью свободны от «духов», обусловленных у нарезных решеток погрешностью деления, имеют значительно меньший уровень рассеянного света, могут быть изготовлены значительно больших размеров и пространственных частот, чем нарезные.

СГОЭ с высокой дифракционной эффективностью – киноформы – становятся уникальным средством коррекции хроматических aberrаций линзовых центрированных систем объективов, что особенно ценно для УФ и ИК областей спектра. Подбором пар оптических материалов путем соединения двух рельефно-фазовых голограмм можно существенно расширить рабочую спектральную область СГОЭ. В свою очередь, путем увеличения глубины рельефа СГОЭ можно реализовать «сжатие» рабочей спектральной области [4].

Научный совет АН СССР по проблеме «Голография» рекомендовал включить работу ГИПО «Разработка технологии изготовления голограммных дифракционных решеток» в перечень «Важнейшие достижения АН СССР в области естественных и общественных наук за 1988 год».

Кроме ГИПО, голографические исследования и разработки в Казани были сосредоточены и активно развивались в Центральном конструкторском бюро «Фотон» (проектные работы – И.А. Камалов, А.А. Антонов, М.Б. Бланк, В.С. Смирнов, Е.И. Рубан), на Казанском оптико-механическом заводе (организация серийного выпуска разработанных в ГИПО при-

боров), в Казанском физико-техническом институте Казанского научного центра РАН (динамическая голография, эхо-голография[5], упрочнение рабочих поверхностей голограммных элементов для копирования рельефа – И.Б. Хайбуллин, И.А. Файзрахманов, Р.Х. Макаева), КазНИИХимФотоПроект (разработка высокоразрешающих регистрирующих фотоматериалов для голографии – А.В. Борин, Н.С. Гафурова), КГУ (некоторые вопросы теории голографии – А.И. Фишман, М.Х. Салахов), КАИ им. А.Н. Туполева (малогабаритные спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками – Н.К. Павлычева), Казанский завод «Союз» (исследования и оптимизация резонатора мощного ИК-лазера Ю.М. Беляков) и ряд мелких фирм (защитные голограммы и т.п.).

Казанская школа голографистов, работавшая под общим научным руководством академика Ю.Н. Денисюка, насчитывала до 50 специалистов с учеными степенями доктора и кандидата наук. По направлению «голография» защищены 43 диссертации (докторских и кандидатских), опубликованы 6 монографий, свыше 500 научных статей и тезисов докладов, получены свыше 250 авторских свидетельств и патентов на изобретения.



Андрианов С.Н.



Бажанов Ю.В.



Белозёров А.Ф.



Лукин А.В.



Мохунь И.И.



Мустафин К.С.



Павлычева Н.К.



Спорник Н.М.



Штырков Е.И.

Представители казанской школы голографистов

Следует отметить, что в 1960-х начале 1970-х годов в ГИПО была создана технология изготовления и репликации нарезных дифракционных решеток (неоценимый вклад в ее развитие внес С.А. Стрежнев). Ее апофеозом стало строительство уникального здания (Сдано в эксплуатацию в 1976 году. Проектная мощность: 500 нарезных, 500 голограммных, 7500 реплик решеток в год) с подземной (на отметке – 12 м) вибро- и термоизолированной лабораторией ($\Delta = \pm 0,01$ мкм, $\Delta t = \pm 0,005$ °С) площадью 1,7 тыс. м², ставшего впоследствии технологической базой для исследований и производства дифракционной, голограммной и асферической оптики. Если к 1963 году спектроскописты СССР за 12 лет получили от ГОИ около 1400 дифракционных решеток, то только в период с 1981 по 1996 гг. 650 потребителям страны из ГИПО было поставлено 129,1 тысяч дифракционных нарезных и голограммных решеток и копий, за 2010-2015 гг. – изготовлены 300 шт. синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ), за 1984-1996 гг. поставлены на экспорт 8526 дифракционных решеток и копий. Экспорт решеток и копий в 1997-2015 гг. составил 14846 штук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров А.Ф. Оптика России. Очерки истории и развития. Казань: Центр инновационных технологий. 2012. – Т. 1. – 2013. – 604 с. – Т. 2. – 612 с.
2. Лукин А.В., Штырков Е.И. Лазерно-голографическая предыстория ГИПО. В сб. «Как это было». – Ч. 1. – ФИАН. – М. 2006. – С. 312-313 (Воспоминания создателей отечественной лазерной техники).
3. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. им. А.Н. Туполева, 2007. – 747 с.
4. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 1. – С. 80 – 87.
5. Штырков Е.И. Оптическая эхо-голография. Оптика и спектроскопия, 2013. – Т. 114. – № 1. – С. 105 – 114.

KAZAN HOLOGRAPHIC SCHOOL

Belozеров A.F.,¹ Ivanov V.P.,¹ Lukin A.V.,¹ ShtyrkovYe.N.²

(¹ OJSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”;

² KFTI KazNTs RAN)

In 1958, specialists of a branch of GOI named after S.I. Vavilov (since 1966 GIPO) began to extend the domain of interference devices intended for investigations of gas-dynamic flows. Besides, they carried out investigation of high-intensity sources of light for communication facilities. In 1963 and 1964, the first generation of ruby and He-Ne lasers was obtained. Such scientific efforts helped to train qualified staff members in optics, lasers, instrumentation, who were working in the field of applied holography in the period of 1964-1966.

In the 1970-ies, a specialized vibro- and thermoprotected building was built at GIPO, and a unique fabrication of diffraction gratings was set up, which became a technological base for the development of the scientific trend of holographic optics.

Besides GIPO in Kazan, developments in the domain of holography were carried out by the design bureau “Foton”, KOMZ, KazNIIKhimFotoProekt, KFTI, KGU, KAI named after A.N. Tupolev. The holographic school in Kazan, whose research supervisor was academician Yu.N. Denisyuk, included about 50 doctors and candidates of science.

**НАУКОЕМКОЕ, ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ» –
ПРИМЕР ГОСУДАРСТВЕННОГО И ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА
В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАФИИ
ЗАЩИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДОКУМЕНТОВ, ЦЕННЫХ БУМАГ
И ПРОДУКЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

Танин Л.В.

(ЗАО «Голографическая индустрия», г. Минск, Республика Беларусь)

Создано наукоемкое высокотехнологичное предприятие «Голографическая индустрия» с крупнотиражным производством комбинированных аналоговых и цифровых голограмм. Предложены и разработаны «Способы формирования изображений, на основе которых получены комбинированные объемные и плоские изображения, взаимодополняющие друг друга». В рамках Государственных научно-технических программ разработаны и запатентованы инновационные, оригинальные, содержащие мировой приоритет средства национальной комплексной защиты (юниграмма и кодограмма), прошедшие этап от теоретических и экспериментальных исследований до промышленного освоения. Национальные средства защиты внедрены на предприятиях Департамента государственных знаков Республики Беларусь при производстве акцизных марок, контрольных (идентификационных) знаков, товарной и товарно-транспортной сопроводительной документации, дипломов о высшем образовании. Среди потребителей голографической продукции: Азербайджан, Непал, Московская пробирная палата, Смоленский геммологический центр по сертификации бриллиантов, Красносельский ювелирпром, монетные дворы Санкт-Петербурга, Казахстана, Литвы.

По оценкам международных организаций потери от подделок ценных бумаг и документов, которые несет мировая экономика, значительны и составляют сотни миллиардов долларов США в год. Большие потери от фальсификации целого ряда документов несет и Республика Беларусь. В первую очередь, это происходит из-за отсутствия должной защиты от подделки, чем пользуются криминальные структуры «теневой» экономики. Использование ценных бумаг и документов с применением современных специальных материалов и средств защиты от подделки позволяет снизить потери от «теневой» экономики и может принести значительные дополнительные доходы в бюджет государства.

Таким образом, создание национальных средств защиты документов, ценных бумаг и особо ценных объектов является одной из важных государственных задач, обеспечивающих ее национальную и экономическую безопасность.

В Республике Беларусь к моменту создания предприятия уже имелась развитая, находящаяся на передовых позициях научная база в области лазерной физики, когерентной и нелинейной оптики, голографии, спектроскопии в лице Института физики Национальной академии наук Беларуси и физического факультета Белорусского государственного университета. С учетом того, что разработка и создание рельефно-фазовой голограммы основаны не только на достижениях в области оптики, были привлечены научные направления, связанные с химическими процессами, точной механикой, информатикой в лице Института химии новых материалов НАН Беларуси, Научно-исследовательского института физико-химических проблем БГУ, Физико-технического института и Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси. Организация наукоемкого производства требует обеспечения уникальным высокотехнологическим оборудованием, а также профессиональными кадрами в соответствующей области при разработке и изготовлении элементов защиты. Также следует отметить, что в Республике

Беларусь на Белорусском оптико-механическом объединении был и есть высокий научно-технический потенциал в оптическом производстве различного рода приборов.

Принимая во внимание рассмотренные выше предпосылки, стал вопрос о создании современного предприятия, отвечающего одному из самых высоких научно-технических уровней в мире, в связи с чем в 1998 году с привлечением крупных иностранных инвестиций было организовано предприятие ЗАО «Голографическая индустрия», учредителями которого являются Институт физики НАН Беларуси, НТУП «Криптотех» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь, ОАО «БелОМО-ММЗ имени С.И.Вавилова» и др. В сотрудничестве с РУП «Минская бумажная фабрика» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь были разработаны, прошли промышленное освоение и стали основным средством защиты важнейших государственных документов, в том числе акцизных марок, контрольных (идентификационных) знаков, товарных и товарно-транспортных сопроводительных документов, комплексные средства защиты, в качестве основы которых были задействованы рельефно-фазовые голограммы.

Оценка состояния и развития научной и производственной базы в Республике Беларусь, связанной с оптическими методами и технологиями, позволяла гарантировать разработку и производство голографических средств защиты на высоком научном уровне с освоением и использованием современных технологий.

Практическая реализация приведенных выше предпосылок по организации, развитию и востребованности в Республике Беларусь данного производства была подкреплена привлечением крупных инвестиций вне государственного бюджета для создания предприятия ЗАО «Голографическая индустрия».

Плодотворное сотрудничество с предприятиями Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь РУП «Минская печатная фабрика» Гознака и ГНТУП «Криптотех», опора на научные кадры и разработки Института физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси и Белорусского государственного университета, привлечение специалистов ООО «Магия света» и «АТВ-Лит» позволило разработать и освоить крупнотиражное производство комплексного средства защиты мирового уровня – юниграммы.

Собственные разработки специалистов ЗАО «Голографическая индустрия» в области фольги горячего тиснения, голографических защитных наклеек, блистерной упаковки позволили выйти на внешние рынки не только России и стран СНГ, но и стран ЕС с долей составляющей более 50 % от производства продукции, выпускаемой предприятием на внутренний рынок.

К 2010 году завершился многолетний подготовительный этап работы коллектива ЗАО «Голографическая индустрия» по выходу на внешний рынок. Была разработана, прошла испытания и было принято решение закупать у нашего предприятия «Голографическая индустрия» голографическую фольгу горячего тиснения для нанесения на акцизные марки алкогольных и табачных изделий Азербайджана и Непала. Годовые поставки фольги горячего тиснения на предприятие «Гарсу Пасаулис» (Литва) составляют около 500 000 квадратных метров. Годовые внутренние поставки в Республике Беларусь основы для юниграммы и кодограммы составляют около одного миллиона квадратных метров, т.е. поставки на экспорт выросли до 50 % внутренних поставок и возросли более чем в сто раз.

Актуальность работы в фактах и цифрах

1. По банкнотам. В подделках евро лидирует Франция. 30 % от общего количества поддельных евро приходится на эту страну. Ежегодно выявляют 600 000 поддельных банкнот и задерживают 30-40 групп фальшивомонетчиков. Существенно облегчили жизнь фальсифика-

торам японские изобретатели, создав в 90-х годах цветной ксерокс с двусторонней печатью. С этого момента начался настоящий бум по изготовлению ксерокопий денежных купюр. По статистике тех лет, в России каждые 9 из 10 выявленных фальшивок были выполнены с применением копировальной техники.

2. По данным Всемирной организации здравоохранения около 30 % лекарств в странах Латинской Америки, Юго-восточной Азии и Африке – поддельные, странам бывшего СССР ВОЗ отводит 20 % (по другим данным 12 %). Мировой оборот поддельных и низкокачественных лекарств – 32 млрд \$. Даже по данным, опубликованным в США, 8 % лекарств выписываемых по рецепту фальсифицированы.

3. Вице-спикер Государственной Думы России Коротков В.Н. (2007 год): «Оборот контрафактной и фальсифицированной продукции в России составляет от 30 до 90% в зависимости от отраслей». Российские данные по пиратской продукции: видеопродукция – 50 %; аудио – 60 %; программное обеспечение и DVD – 90 %. Целые отрасли легкой промышленности поставлены на грань выживания. Так общий объем контрафактной продукции легкой промышленности на российском рынке в 2008 году составлял 780 млрд российских рублей. Это более чем в 2 раза превышает уровень легального производства и импорта. При этом значительная часть детской одежды и обуви не соответствует требованиям гигиены и безопасности.

4. Ущерб от подделки и фальсификации брендовых товаров по данным Организации экономического сотрудничества и развития (без учета товаров реализуемых на местных рынках и через Интернет) составляет 200 млрд. \$, согласно данным Всемирной таможенной организации – 450 млрд. \$, по мнению Международной торговой палаты – 600 млрд. \$.

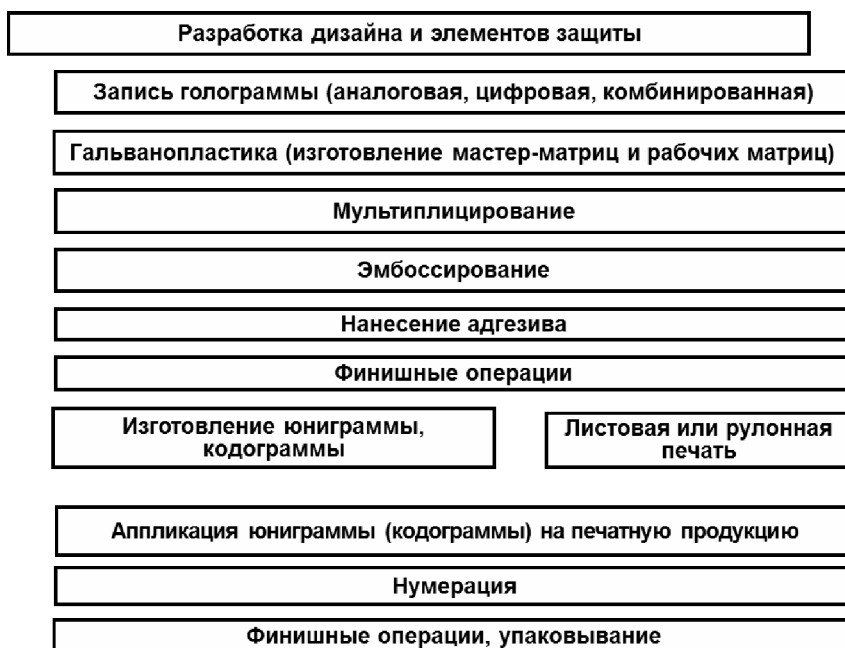
5. И еще такой курьезный факт, на тем не менее показательный. В США проверили сотрудников правительственных организаций, включая Агентство по национальной безопасности и даже Белый дом, и выявили 135 работников с поддельными дипломами о высшем образовании.

Голограмма – это сформированная на каком-либо носителе интерференционная структура, преобразующая методом дифракции падающее на нее световое излучение в изображение с определенными амплитудно-фазовыми, частотными (цветовыми) и в ряде случаев поляризационными свойствами.

Защитная голограмма (СТБ 997-2011) – это голограмма, которая удовлетворяет определенным техническим требованиям (СТБ 996-2011) и используется в соответствии с действующим законодательством при изготовлении бланков ценных бумаг и документов с определенной степенью защиты в качестве средства защиты от подделки.

В настоящее время ЗАО «Голографическая индустрия» обладает технологиями полного цикла производства голограмм для защиты ценных бумаг, документов и продукции, которые имеют ряд преимуществ: визуальная опознаваемость голограмм; высокая информационная емкость; невозможность копирования контактными, гальваническими, фотографическими способами; низкая себестоимость; интегрируемость с распространенными технологиями; высокая наукоемкость, основанная на новейших достижениях фундаментальной и прикладной оптики.

Юниграмма. Согласно СТБ 997-2011 «Бланки ценных бумаг и документов с определенной степенью защиты, документы с определенной степенью защиты» юниграмма – средство защиты, представляющая собой продукт совмещения защитной голограммы и полимерной многослойной пленки со скрытым поляризационным изображением, визуализируемым с помощью идентификатора, содержащего поляроидную пленку. Следует отметить, что это не механическое соединение двух защитных средств в одно, а их объединение предполагает определенные свойства того и другого объекта, которые позволяют по крайней мере сохранить защитные элементы двух средств с задачей их усиления за счет друг друга.



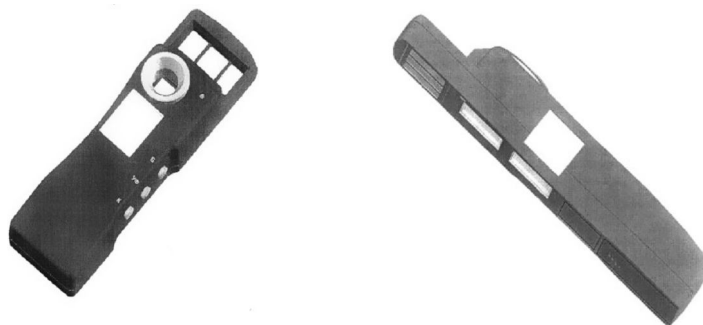
Многофункциональный технологический процесс изготовления комплексных средств защиты на голографической основе



Виды комплексных средств защиты и другой продукции на основе голографических методов

Кодограмма является дальнейшей инновационной разработкой юниграммы, обеспечивающей приборный контроль за счет введения голографического кода, при сохранении всех защитных свойств юниграммы. Голографический код позволяет шифровать информацию, например, по группе изделий, выпускаемых разными предприятиями, при внешне не различных дизайнах голограммы. Кодограмма при своем изготовлении требует позиционирования по одной координате. Используется для защиты товарной и товарно-транспортной документации. Разработка кодограммы велась в рамках задания 3-12 ГНТП «Защита» 2006-2009 гг. при участии «Института физики им. Б.И. Степанова», Белорусского государственного университета, ЗАО «Голографическая индустрия», РУП «Минская печатная фабрика Гознака».

Многофункциональный идентификатор серийно выпускается на ОАО «Минский механический завод имени С.И. Вавилова».



Многофункциональный идентификатор

Идентификатор осуществляет контроль и визуализацию:

- скрытых голографических изображений, распределенных по поверхности и локализованных в конкретной области, записанных аналоговым и цифровыми методами;
- муаровых изображений, юниграмм, нерегулярных растровых структур, выполненных в виде набора несимметричных фигур и записанных в виде рельефной голограммы;
- основных средств полиграфической защиты (микротекст, ирисный раскат, красителей со стоксовым и антистоксовым сдвигом).

Результаты работы. Экономический и социальный эффекты

Анализ средств защиты ценных бумаг, документов, других материальных объектов с учетом условий обращения, комплексности, соответствия формам защиты, полноте уровней контроля и критериям надежности позволил выделить голографические средства в качестве базовых для создания многоуровневой системы, как реализации основного принципа защиты.

Оценка состояния и развития научной и производственной базы в Республике Беларусь, связанной с оптическими методами и технологиями, позволяла гарантировать разработку и производство голографических средств защиты на высоком научном уровне с освоением и использованием современных технологий.

Практическая реализация приведенных выше предпосылок по успешности создания, развития и востребованности в Республике Беларусь данного производства была подкреплена привлечением крупных инвестиций вне государственного бюджета.

Плодотворное сотрудничество с предприятиями Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь РУП «Минская печатная фабрика Гознака» и ГНТУП «Криптотех», опора на научные кадры и разработки Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси и Белорусского государственного университета, привлечение специалистов ООО «Магия света» и «АТВ-Лит» позволило разработать и освоить крупнотиражное производство комплексного средства защиты мирового уровня – юниграммы.

Основная задача, которая решалась соискателями выдвигаемой работы, состояла в научно-техническом обеспечении производства рельефных голограмм, создании комплексных проектов, включающих не только стадию изготовления голограмм, но и разработку комплексных систем записи, кодирования, создания новых степеней защиты, способов и средств идентификации.

Сочетание компьютерных методов кодирования с оптическими обеспечивает высокую степень защиты от подделки. Система видеозаписи и ее последующий монтаж позволяют записывать изменяющиеся во времени процессы и структуры, что значительно повышает защитные свойства голограмм. Развитие технологии позволило создать и более сложные компьютерно-генерированные голограммы, состоящие из множества дифракционных оптических микроэлементов. Каждый дифракционный микроэлемент определенным способом изменяет

направление падающего на него света. По форме эти микроэлементы могут быть точками, линиями, а в комбинации они составляют голографическое изображение. Данная технология позволяет получить гораздо более яркое изображение, чем в классических голограммах. Изменение параметров записываемых дифракционных оптических микроэлементов обеспечивает более высокий уровень защиты голограмм.

В настоящее время ЗАО «Голографическая индустрия» обладает разработанными на основе многолетних исследований и освоенными для промышленного применения технологиями полного цикла производства голограмм для защиты ценных бумаг, документов и продукции. Данные технологии обладают рядом преимуществ: визуальная опознаваемость голограмм; высокая информационная емкость; невозможность копирования контактными, гальваническими, фотографическими способами; низкая себестоимость; интегрируемость с распространенными технологиями; высокая наукоемкость, основанная на новейших достижениях фундаментальной и прикладной оптики.

Собственные разработки специалистов ЗАО «Голографическая индустрия» в области фольги горячего тиснения, голографических защитных наклеек, блистерной упаковки позволили выйти на внешние рынки не только России и стран СНГ, но и стран ЕС с долей составляющей более 50 % от производства на внутренний рынок.

За период с 2005 г., с момента внедрения юниграммы, по 2014 г. РУП «Минская печатная фабрика» Гознака изготовлено акцизных марок на алкогольные и табачные изделия всего на сумму 361903,1 млн. руб., в том числе: акцизных марок на табачные изделия – на сумму 220224,4 млн. руб., юниграммы для контрольных (идентификационных) знаков – на сумму 192471,4 млн. руб., кодограммы для бланков ТТН-1 и ТН-2 на сумму не менее 28656,9 млн. руб.

За период с 2005 г. на РУП «Минская печатная фабрика» Гознака было произведено не менее 4674,06 тыс.м² средств защиты для акцизных марок, контрольных (идентификационных) знаков и кодограммы для ТТН на общую сумму не менее 583030,5 млн. руб.

Суммарный выпуск средств защиты составил в долларовом эквиваленте 100 миллионов.

Приведенная выше сумма отражает только прямые затраты на выпуск ценных бумаг и документов в части средств защиты. В тоже время обеспечение необходимой и достаточной защиты ценных бумаг и документов является одной из важнейших государственных задач, направленной на поддержание национальной и экономической безопасности государства. Эта проблема, так или иначе, затрагивает интересы практически всех органов государственного управления, юридических лиц и граждан, позволяет повысить сохранность государственного имущества, снизить незаконный оборот товарно-материальных ценностей и финансовых потоков, обеспечить полноту сбора налогов.

Применение контрольных знаков для маркировки отдельных видов товаров позволило отсеять нелегальный оборот, что благоприятно сказалось на поступлении в бюджет акцизных сборов. Так в 2005 году (год введения контрольных знаков) поступления от акцизов в бюджет по импортируемому в страну пиву возросло в 2,2 раза, по маслам моторным – в 1,3 раза.

Применение товарно-транспортных и товарных накладных, защищенных юниграммой, позволяет отслеживать товарно-материальные потоки, анализировать возможные пути ухода от уплаты налогов, незаконный оборот наличных денег, а также пути функционирования «теневой» экономики, увеличить доходную часть бюджета и полноту налоговых поступлений.

К 2010 году завершился многолетний подготовительный этап работы коллектива ЗАО «Голографическая индустрия» по выходу на внешний рынок. Была разработана, прошла испытания и было принято решение закупать у предприятия голографическую фольгу горячего тиснения для нанесения на акцизные марки алкогольных и табачных изделий Азербайджана и Непала. Годовые поставки фольги горячего тиснения выросли до 50 % внутренних поставок с соответствующей валютной выручкой.

Этапы выполнения работы и основные результаты обобщены в следующих тезисах:

1. Предложена идея создания, разработана научная концепция и бизнес-план инвестиционного проекта организации современного предприятия с наукоемким высокотехнологичным производством рельефно-фазовых тисненых голограмм, используя последние достижения в области лазерной физики, когерентной оптики и голографии; 1996 г.

2. В 1998 г. эта идея была реализована на практике (без привлечения бюджетного финансирования).

Основано, создано и построено наукоемкое высокотехнологичное белорусско-швейцарское предприятие «Голографическая индустрия», не имеющее аналогов в мире с крупнотиражным производством комбинированных аналоговых и цифровых голограмм.

Белорусско-швейцарское совместное предприятие «Голографическая индустрия» зарегистрировано в форме закрытого акционерного общества решением Министерства внешнеэкономических связей Республики Беларусь от 07 мая 1998 г. за № 2000 в Реестре общереспубликанской регистрации.

По решению Государственного экспертного Совета по радиоэлектронике, приборостроению и вычислительной технике предприятие «Голографическая индустрия» было зарегистрировано в Реестре высокотехнологичных предприятий и производств Республики Беларусь, регистрационный номер 16 ПРЕ от 25.08.1998 г. (письмо ГКНТ Республика Беларусь № 05-18/1897 от 27.08.1998 г.).

3. Разработана «Комплексная технология изготовления тисненых рельефно-фазовых голограмм, комплект документации НИР, технологической и конструкторской документации для мало и крупносерийного производства тисненых рельефно-фазовых голограмм».

4. Разработаны технологии полного цикла изготовления голограмм, включая оригинальные запатентованные технологии защиты, тиражирования, идентификации голографических знаков и способов их нанесения.

5. Предложены, созданы и запатентованы (в СССР, США, ФРГ, Болгарии, Чехословакии) «Способы формирования изображений», на основе которых получены комбинированные объемные и плоские изображения, взаимодополняющие друг друга».

В 1980 году, используя идею патента «Способы формирования изображений», создан промышленный образец «Знак голографический с совмещенным фотолитографическим изображением», основанный на формировании комбинированного изображения – голографического изображения, совмещенного с фотолитографическим изображением, свидетельство № 10534 от 20.05.1980 г., выданный Государственным комитетом СССР по делам изобретений и открытий.

Разработана и освоена технология промышленного производства отражательных голограмм (1980 г.). На основании диплома оргкомитета «Олимпиада-80» № 6461 от 23 января 1980 г., выданного Белорусскому оптико-механическому объединению БелОМО, Институту физики АН БССР на право промышленного производства лучших изделий (товаров) с олимпийской символикой «Олимпийский голографический сувенир» выпущена партия голограмм 3 000 штук.

В 2004 году, используя идею патента «Способы формирования изображений», получена юниграмма, основанная на формировании комбинированного изображения – голографического изображения, совмещенного со скрытым латентным изображением, патент «Защитная метка изделия» № 1869 от 01.12.2004 г.

6. Заключено лицензионное соглашение по передаче (частично) патентных прав фирме Samsung Electronics Corporation (Южная Корея) на запатентованное в США крупное изобретение на способы получения комбинированных изображений. Зарегистрировано в Патентном ведомстве Республики Беларусь под № 93-10001.

7. Разработаны комплексные проекты, включающие не только стадию изготовления голограмм, но и формирования комплексных систем записи, кодирования, создания новых степеней защиты, способов и средств идентификации.

8. С целью повышения эффективности создания национальной системы защиты документов, ценных бумаг и продукции в Республике Беларусь была проведена реорганизация белорусско-швейцарского предприятия «Голографическая индустрия» в белорусское предприятие с контрольным пакетом акций у государства.

Решением Минского горисполкома от 17 апреля 2003 г. № 568 зарегистрировано закрытое акционерное общество «Голографическая индустрия» в Едином государственном регистре юридических лиц и индивидуальных предпринимателей за № 101482057.

9. Предложена идея и разработаны научные концепции Государственной научно-технической программы «Технологии защиты и средства идентификации ценных бумаг, документов и продукции» (Шифр «Идентификация», 2003-2005 гг.)», а также Государственной научно-технической программы «Совершенствование защиты и создание новых современных технологий защиты ценных бумаг и документов от подделки, а также материалов и средств защиты» (Шифр «Защита документов», 2006-2007 гг.) (научный руководитель этих программ канд. физ. мат. наук Танин Л.В.).

10. Предложены, разработаны и запатентованы инновационные, оригинальные, содержащие мировой приоритет средства национальной комплексной защиты (юниграмма и кодограмма), прошедшие этап от теоретических и экспериментальных исследований до промышленного освоения.

11. Разработаны и внедрены национальные средства защиты в Республике Беларусь принципиально отличающиеся своей научной новизной, уникальностью, оригинальностью, с использованием крупнотиражного их производства, основанного на собственных запатентованных технологиях.

12. Внедрены на предприятиях Департамента государственных знаков Республики Беларусь национальные средства защиты, юниграмма и кодограмма, при производстве акцизных марок, контрольных (идентификационных) знаков, товарной и товарно-транспортной сопроводительной документации, дипломов о высшем образовании.

13. Созданы новые технологии и средства голографической защиты – голографические ламинаты на паспорта и водительские удостоверения, что решает проблему импортозамещения.

14. Разработаны, прошли промышленное освоение и внедрение новые голографические средства защиты, обладающие большим экспортным потенциалом – фольга горячего тиснения, блистерная упаковка сертифицированных бриллиантов, голографические наклейки. Среди потребителей голографической продукции: Азербайджан, Непал, Московская пробирная палата, Смоленский геммологический центр по сертификации бриллиантов, Красносельский ювелирпром, монетные дворы Санкт-Петербурга, Казахстана, Литвы.

15. Создана и внедрена система менеджмента качества выпускаемого на предприятии «Голографическая индустрия» ассортимента голографической продукции ISO-9001, что подтверждает сертификат СТБ ISO 9001-2009, выданный Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь.

16. Совместно с ОАО «БелОМО-ММЗ имени С.И.Вавилова» разработан и запатентован в России и Республике Беларусь многофункциональный идентификатор голографических защитных элементов и освоено его серийное производство.

17. Совместно с Белорусским государственным университетом в рамках ГНТП «Идентификация» разработан, изготовлен и внедрен в ЗАО «Голографическая индустрия» аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики для объективной оценки показателей голографических элементов защиты в процессе крупнотиражного производства.

18. На примере предприятия ЗАО «Голографическая индустрия» предложена и реализована на практике идея, основанная на создании наукоемкого предприятия в форме закрытого акционерного общества, в состав которого входят как государственные, так и частные предприятия, а именно предприятия двух форм собственности: государственной и частной, что позволяет повысить эффективность и оперативность принимаемых решений, направленных на развитие и внедрение научных результатов.

19. Эффективность подтверждена снижением незаконного теневого оборота товарно-материальных ценностей и финансовых потоков, обеспечением полноты сбора налогов, что является одним из элементов национальной и экономической безопасности Республики Беларусь.

20. Создана в Республике Беларусь уникальная научная школа специалистов в области голографии, объединяющая ученых-исследователей и производителей.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований защищены 50 патентами и авторскими свидетельствами как в нашей стране, так и за рубежом, опубликованы в 56 научных статьях, докладывались на Международных конференциях: Hologack-Hologrint, Cross, США, Флорида 1997 г.; Австрия, Вена 2007 г.; Китай, Гонконг 2007; Голо-Экспо-2004-2011 г. Москва, Киев, Минск, и были представлены на многочисленных Международных выставках: в Финляндии (Хельсинки 1980 г.) «Советская голография»; в Австрии (Вена 1981 г.) «Голография в СССР»; в Дании (Копенгаген 1983 г.) «Голография, Лазеры»; Великобритания (Лондон 1985 г.) «Голография в СССР»; Япония (Цукуба 1985 г.) ЭКСПО-85, Австралия (Брисбен, 1988 г.) ЭКСПО-88, Наука и техника XXI век; Республика Беларусь (Минск, 1991 г.) «Голография-1991 г.»; Республика Беларусь Жодино (2007 г.) «Голография-2007», Астана (2012 г.) «Голография-2012», Гомель (2013 г.) «Голография-2013», Гродно (2014 г.), Витебск (2012 г.) «Голография-2012», Минск (2014 г.) «Голография-2014», Жодино (2015 г.) «Голография-2015»; а также на специализированных выставках по защитной голографии на «Голо-Экспо» 2007-2011 гг. (Москва, Киев, Минск) и др.

Предприятие награждено грамотами и дипломами на различных Международных конференциях и выставках. Также среди наград: награда в номинации «За развитие инновационных технологий, направленных на защиту товаров продовольственного рынка Республики Беларусь» на X и XI Республиканских конкурсах «Продукт года-2007», «Продукт года-2008» (Минск, Республика Беларусь, 2007, 2008 г.); Международная награда в номинации «Упаковка» на международной конференции, проводимой оргкомитетом Международной ассоциации производителей защитных голограмм «Holo-pack Holo-print 2008» за блистерную упаковку сертифицированных бриллиантов с голографическим вкладышем (Торонто, Канада, 2008); международный Золотой Приз за лучшую торговую марку нового тысячелетия (Париж, Франция, 2009 г.); международная награда «Best Enterprises» («Лучшие предприятия») – за динамику роста компании в своей отрасли, в рамках Международной конференции «Страны ЕС и СНГ. Опыт и перспективы экономического сотрудничества в условиях глобального финансово-экономического кризиса. Интересы бизнеса» (Вильнюс, Литва, 2009 г.); международный приз Европы «За качество» (International Europe Award «For quality») (Мадрид, Испания, 2009 г.); Хрустальный ГранПри XII Республиканского конкурса «Продукт года 2009» (Минск, Республика Беларусь); награда европейской организации European Society for Quality Research-ESQR (Европейское Общество Исследований Качества) – премия «European Award for Best Practices 2011» (Европейская Премия за Лучшую Практику 2011), вручаемая компаниям со всего мира за достижение значительных результатов в области качества и за внедрение современных методов управления качеством (Брюссель, Бельгия, 2011 г.), Международная Премия за Качество и Технологии «Арка Европы», Франкфурт, 2012; лауреат конкурса «Лучший предприниматель 2012 года г. Минска», в сфере инновационной деятельности; свидетельство о занесении на доску почета Первомайского района г. Минска за лучшие результаты в выполнении основных целевых показателей прогноза социально-экономического развития по итогам 2014 года.

**SCIENCE-INTENSIVE, HIGH-TECH ENTERPRISE CJSC
«HOLOGRAPHY INDUSTRY» – AN EXAMPLE OF PUBLIC
AND PRIVATE PARTNERSHIP IN THE FIELD
OF ANTI-COUNTERFEITING TECHNOLOGY OF DOCUMENTS,
SECURITIES AND PRODUCTS BASED ON HOLOGRAPHY
IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

Tanin L.

(CJSC «Holography Industry», Minsk, Republic of Belarus)

The science-intensive high-tech enterprise «Holography Industry» with long-run production of combined analog and digital holograms was founded. «Methods of forming images» were proposed and developed. Combined three-dimensional and flat images which are complementary to each other were received on their basis. As part of the State scientific and technical programs the national original innovative complex means of protection that contains the global priority (unigram and codogram) were developed and patented. They went through the stage of theoretical and experimental research up to the industrial development. National complex security means were implemented in the enterprises of the Department of State Signs of the Republic of Belarus in the production of excise stamps, control (identification) signs, consignment documents and delivery notes, diplomas of higher education. Among the consumers of holographic products are: Azerbaijan, Nepal, Moscow assay office, Smolensk Gemological center for certification of diamonds, Krasnoselskaya jewelry industry, Mints of St. Petersburg, Kazakhstan, Lithuania.

According to the evaluation of international organizations, the losses from counterfeiting issues and documents that the global economy sustains are significant and equal to milliards of dollars a year. Our Republic also suffers the losses from document forgery. Primarily, this is due to the lack of reasonable counterfeit protection and the criminal world of the black market uses this for its mercenary purposes. The use of specialties and documents with modern special materials and facilities of protection against forgery will allow to reduce losses from «shadow» economy and generate additional significant state budget revenue.

Thus, the creation of national document and object protection in the Republic of Belarus is one of the major state tasks that ensure national and economic security.

In Belarus, by the time the organization was formed there had already been a well-developed, scientific background being at the cutting edge in the field of laser physics, coherent and nonlinear optics, holography, spectroscopy worked out by the Institute of Physics of the National Academy of Sciences and the Faculty of Physics of the Belarusian State University. Taking into consideration the fact that the development and creation of relief-phase holograms are based not only on the achievements in the field of optics, some research areas were involved related to chemical processes, precision mechanics, computer science represented by Chemistry Institute of new materials NAS of Belarus, Scientific Research Institute for physical and chemical problems of the Belarusian State University, the Institute of Physics and the Joint Institute for Informatics problems NAS of Belarus. For designing and manufacturing security elements, the organization of high-tech industry requires a unique high-tech equipment and professional staff in a corresponding field. In addition, it should be noted that Belarusian Optical and Mechanical Association in the Republic of Belarus has a high scientific and technical potential in the production of various kinds of optical devices.

According to the facts mentioned above, the problem of the establishment of a modern enterprise that corresponds to one of the highest scientific and technical level in the world arose. Therefore in 1998 CJSC «Holography Industry» was organized by means of involving intensive foreign investments.

It was founded by Institute of Physics, National Academy of Sciences, NTUP «Cryptotech» Department of State Signs of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus, JSC «S.I.Vavilov BelOMO-MMZ» and others. In cooperation with RUE «Minsk Paper Factory» (the Department of State Marks of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus) complex security means based on relief-phase hologram were developed, industrialized and became the main means of protecting the most important state documents, including excise labels, control (identification) marks, all documents related to the delivery (consignment notes, waybills and etc.).

The state and development evaluation of scientific and industrial background in the Republic of Belarus related to optical methods and technologies allowed to ensure the development and production of holographic protection on a high scientific level with the use of modern technology.

The practical implementation of the above prerequisites for the organization, development and demand in the Republic of Belarus for this production was strengthened by attracting major investments off the state budget for the formation of the enterprise CJSC «Holography Industry».

Fruitful cooperation with enterprises of the Department of State Marks of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus RUE «Minsk printing factory» of Goznak and GETUP «Cryptotech», including the academic staff and research results of B.I. Stepanova Institute of Physics NAS of Belarus and the Belarusian State University, the involvement of specialists of «Light Magic» Ltd. and «ATV-Lit» made it possible to design and develop high-volume production of complex protection of the world level – the unigram.

Own developments of specialists of CJSC «Holography Industry» in the field of hot stamping foil, holographic security labels, blister package allowed to access outer markets not only of Russia and CIS countries, but also the countries of the EU with a share of more than 50 % of production manufactured by the enterprise for the domestic market.

By the year 2010 a long preparatory stage of the team work of CJSC «Holography Industry» for entering the foreign market had ended. Holographic hot stamping foil was developed, tested and it was decided to purchase it from our company «Holography Industry» for applying tax stamps on alcohol and tobacco of Azerbaijan and Nepal. Annual supply of hot stamping foil for enterprise «Garsu Pasaulis» (Lithuania) is approximately 500,000 square metres. Annual domestic supplies of the base for the unigram and codogram in the Republic of Belarus are about one million square meters, i.e. export supplies increased to 50 % of domestic supplies. It means they increased more than a hundred times.

The relevance of the work in facts and figures

1. Banknotes. France leads in euro counterfeiting. 30 % of the total amount of counterfeit (forged) Euro falls on this country. Annually 600,000 counterfeit banknotes are identified and 30-40 groups of counterfeiters are apprehended. These were the Japanese inventors who created the color copier with duplex printing in the 90-ies and, thus, they made life much easier for counterfeiters. From that moment there was a real boom for the production of photocopies of banknotes. According to the statistics of those years, in Russia every 9 out of 10 identified forgeries were made with the use of copy machines.

2. According to the figures from the world health organization, about 30% of medicines in Latin America, South-East Asia and Africa are counterfeit, in the countries of the former USSR is 20 % (according to other sources 12 %). The global circulation of counterfeit and substandard medications is 32 billion \$. Even according to data published in the USA, 8 % of prescribed medicines are counterfeit.

3. Vice-speaker of Russian State Duma Korotkov V.N. (2007): «The turnover of counterfeit products in Russia is from 30% to 90% depending on the branch of industry». Russian data on pirated products: video products – 50%; audio products – 60%; software and DVD 90 %. Many branches of light industry are on the verge of disaster. So the total volume of counterfeit products of light industry

on the Russian market in 2008 amounted to 780 billion Russian rubles. This is more than twice the amount of the legal production level and imports. A good deal of children’s clothing and footwear does not conform to hygienic and safety standards.

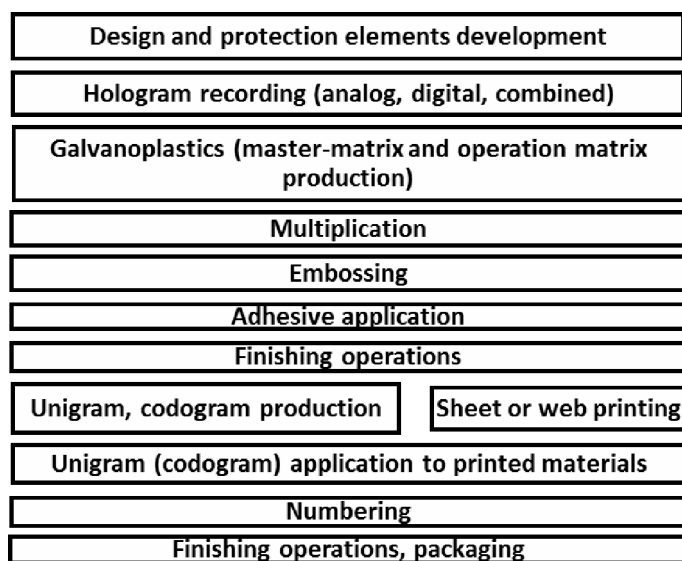
4. According to the Organization of economic cooperation and development the damage from counterfeiting and falsifying branded goods (excluding products sold in local markets and the Internet) is 200 billion \$, according to the world customs organization – 450 billion \$, according to the International chamber of Commerce – 600 billion \$.

5. And there is another curious fact but, nevertheless, still significant. In the USA employees of government organizations, including the Agency for national security and even the White House were examined, and it was identified that 135 employees had fake diplomas.

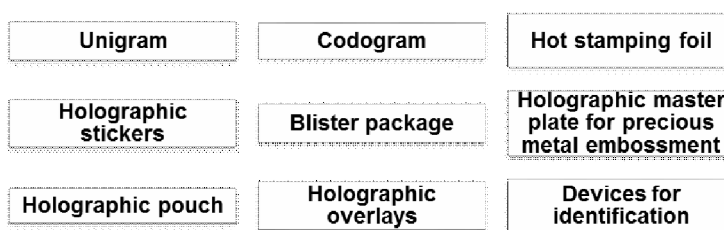
A hologram is an interference structure formed on a carrier, which converts by means of diffraction method the incident light radiation into an image with definite amplitude-phase, frequency (color) and in some cases polarization properties.

Security hologram (STB 997-2011) is a hologram that meets certain technical requirements (STB 996-2011) and used in accordance with the legislation in force in manufacturing stationery forms of security papers and documents with a certain degree of protection as a means of protection against forgery.

At the present time CJSC «Holography Industry» has technology of fully-integrated production of holograms to protect of documents, papers and products, which have several advantages: the visual recognizability of holograms; high informational capacity; the inability to copy the contact galvanic photographic methods; low costs; high integration capacity with common technology; high research intensity, based on the latest achievements of fundamental and applied optics.



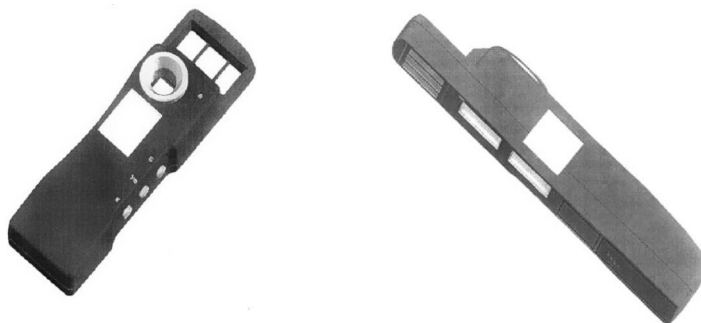
Multipurpose technological process of production of complex security means on holographic basis



Types of complex protection means and other production based on holographic methods

Unigram. According to STB 997-2011 «Forms of issues and documents with a certain security feature, documents with a certain security feature», Unigram – is a security measure, representing a product combining a security hologram and a polymeric multilayer film with a latent polarizing image visualized by means of an identifier with a polarized film. It should be noted that it's not a mechanical joining of two protection elements into one. Their unification is supposed to have certain properties of both objects which at least allows to keep protective elements of two means with the aim of their strengthening thanks to each other.

Codogram is a further innovative development of the Unigram providing instrumental control due to introduction of a holographic code while keeping all protective properties of a Unigram. The holographic code allows to encrypt information, for example, about a group of products produced by different enterprises with outwardly similar holograms. The process of codogram production requires one-by-one coordinate positioning. It is used for delivery note and waybill security. Code pattern has been developed as part of the project 3-12 GNTF «Security» 2006-2009. The project involved such companies and establishments as «B.I.Stepanov Institute of Physics», the Belarusian State University, CJSC «Holography Industry» and «Minsk Printing Factory» of Goznak. Multi-functional identifier is a commercial product of «S.I.Vavilov Minsk mechanical factory».



Multi-functional Identifier

The identifier visualizes and checks the following elements:

- latent holographic images (recorded by means of analog and digital methods) dispersed on the surface or localized in some specific area;
- moiré images, unigrams, irregular screen-type patterns made in the form of a set of dissymmetrical figures and recorded as a relief hologram;
- basic polygraphic security elements (microtext, ink iris distribution with Stokes and anti-Stokes shift).

Work Result. Economic and Social Effects

The analysis of documents and other object security elements in combination with such factors as 1) their circulation areas and complexity; 2) security pattern and control level requirements; 3) reliability criteria requirements, made it possible to select basic holographic elements for the creation of a multi-level protection system as the realization of the main security principle.

The evaluation of Belarusian scientific and industrial facilities in the sphere of optics guaranteed top-level holographic element development and production involving modern technologies and methods.

Practical implementation of the conditions mentioned above for successful creation, development and demand for such kind of production was supported by means of large-scale investments from non-governmental budget.

Fruitful cooperation with such establishments of Ministry of Finance of the Republic of Belarus as the Republican unitary enterprise «Minsk Printing Factory» of Goznak and State unitary enterprise «Cryptotech», in combination with scientific works and brainpower of «B.I.Stepanov Institute of Physics» of Belarusian National Scientific Academy and Belarusian State University in cooperation with specialists from «Light Magic» Ltd. and «ATV-Lit» Ltd. made it possible to develop and set up a long-run production of a complex protection element – unigram.

The main problem to be solved by the applicants of the presented work was to provide scientific and technical support for relief hologram production and for creation of complex projects including not only hologram production stage but the development of a complex system for hologram recording, encoding, the creation of new security levels and identification means.

The combination of computer encoding and optical methods provides a high level of anti-counterfeiting protection. Video recording system and its further editing makes it possible to record time-changeable processes and structures which considerably increases hologram protection features. Technological progress made it possible to create still more complex computer-generated holograms consisting of a number of diffractive optical micro-elements. Each diffractive micro-element in its own way changes the direction of impinging light rays. These micro-elements can have a shape of spots or lines. In their combination all these spots and lines make up a holographic image. This technology makes it possible to have a much brighter image in comparison with that of classic holograms. Changes of diffraction elements' parameters provide a higher security level of holograms.

At present CJSC «Holography Industry» possesses full-cycle hologram production technologies based on the results of a long-lasting research. The holograms are used for document, valuable paper and goods protection. These technologies have a range of advantages: hologram visual recognizability; high information capacity; impossibility to be copied by means of contact, galvanic or photographic methods; low cost; high integration capacity with widespread technologies; high level of research intensity based on the new achievements of the fundamental and applied optics.

The self-engineered works of «Holography Industry» specialists in the sphere of hot stamping foil application, holographic protective labels and blister packaging made it possible to reach not only outer markets of Russia and CIS, but EU markets as well. The production level for EU markets is more than 50 per cent of products for internal market.

In the period from 2005, from the moment of the implementation of the unigram, till 2014, the Republican unitary enterprise «Minsk printing factory» of Goznak produced the excise stamps for the alcohol and tobacco products in the amount of 361903,1 mln. rub, which includes: excise labels for tobacco products in the amount of 220224,4 mln. rub, unigrams for control (identification marks) in the amount of 192471,4 mln. rub., codograms for the forms of delivery notes and waybills in the amount of 28656,9 mln. rub.

Since 2005 the Republican unitary enterprise «Minsk printing factory» of Goznak has produced more than 4674,06 thousand square metres of safety products for excise labels, control (identification) marks and codograms for delivery notes in the total amount of more than 583030, 5 mln. rub.

The total production of security means in dollar terms was equal to 100 mln.

This sum of money reflects only direct expenses for the production of security papers and documents as part of security means. At the same time the most important government task is to provide the necessary and adequate protection of the security papers and documents. The aim of this task is to support national and economical state security. This problem practically concerns the interests of all State Administrative bodies, legal bodies and citizens, permits to raise the safety of the public property and to cut the illegal trafficking of goods, materials and financial flows, to ensure the full collection of taxes.

The use of the control signs for marking the certain types of goods allowed to curtail illicit financial outflow which was good for excise tax budget revenue. So, in 2005 (the year when the

control signs were implemented) the excise tax budget revenue from imported beer in the country increased in 2,2 times, for engine oil – increased in 1,3 times.

The use of waybills and packing lists, protected by unigramm, permits to control the goods and material flows and to analyze the possible ways of tax evasion, illegal cash circulation, and the «shadow» economy ways of functioning. It also permits to increase the budget revenue and make tax proceeding better.

By the year of 2010 JSC «Holography Industry» has finished a long-term preparation stage for foreign outlet. Holographic hot stamping foil for excise stamps was worked out, tested and sold for alcohol and tobacco production in Azerbaijan and Nepal. Annual supplies of hot stamping foil have raised up to 50% in comparison with inner supplies with appropriate currency returns.

Working stages and its main results are summarized in the following theses:

1. In 1996 the idea of creation was proposed, the scientific conception and business plan for the capital investment project of the enterprise with science-intensive high-tech production of relief-phase holograms were developed, using the latest researches in the sphere of laser physics, coherent optics and holography;

2. In 1998 this idea was realized in practice (without budgetary financing).

And so, science-intensive high-tech Belarusian-Swiss enterprise «Holographic Industry» with a long-run production of combined analog and digital holograms was founded. It does not have any analogues in the world.

Belarusian-Swiss joint enterprise «Holography Industry» was registered as Closed Joint Stock Company «Holography Industry» according to the Ministry of foreign economic relations of the Republic of Belarus on May, 7th 1998, № 2000 in the List of republican registration).

According to the decision of State Expert Board for radionics, instrumentation and computing techniques CJSC «Holography Industry» was registered in the List of high-tech industries of the Republic of Belarus, registration № 16 PRE from August 28th, 1998 (Republic of Belarus GCST letter №05-18/1897 from August 28th, 1998).

3. «Complex technology of relief-phase hologram production, set of documentation for SIR, technologic and construction documentation for small and large lot production of embossed relief-phase holograms» was developed.

4. The technology of full circle hologram production was developed, including original patented technology of protecting, copying, identifying and applying holographic marks.

5. «Image forming means» were proposed, developed and patented in the USSR, USA, Federal Republic of Germany, Bulgaria, Czechoslovakia. They allowed to obtain combined volumetric and plain images mutually completed each other.

In 1980, using the idea of «image forming means» patent, the industrial sample «holographic mark with a combined photolithographic image» was created. It was based on the formation of a combined image – holographic image coincident with a photolithographic image, certificate № 10534, May 20th, 1980, which was issued by the USSR State Committee for Inventions and Discoveries.

In 1980 the technology of reflective hologram industrial production was developed and mastered 3000 holograms were produced in virtue of the diploma № 6461 January 23d, 1980 which was issued by the Organizing Committee «Olympiad-80» to Belarusian Optical and Mechanical Association BelOMO, the Institute of Physics (AS BSSR) for the right of industrial production of the best products (goods) with Olympic symbolics «Olympic holographic souvenir»

In 2004 using the idea of patent «The image forming means» the unigram based on the formation of multiple image – holographic image coincident with internal latent image- was created (patent «Protective label mark» № 1869 December 1st, 2004).

6. License agreement for the (partial) transfer of patent rights to Samsung Electronics Corporation (South Korea) was concluded. It dealt with great invention of image forming means patented in the USA. It was registered in Patent Authority by № 93-10001.

7. Multipurpose projects, which included not only the stage of producing holograms, but the formation of multipurpose systems of recording, coding, creating new security levels, means and methods of identification, were developed.

8. In order to increase the effectiveness of the national system of documents, specialties and product protection in the Republic of Belarus, Belarusian-Swiss enterprise «Holography industry» was reorganized into Belarusian enterprise with State major shareholding.

Closed joint stock company «Holography Industry» was registered in the Unified State Register of Legal Entities and Individual Entrepreneurs №101482057 by the decision of Minsk City Executive Committee, April 17th, 2003 by №568.

9. The idea and scientific concepts of the State scientific and technical programs «Protection technology and identification of specialties, documents and products» (code «Identification», 2003-2005) and «The improvement of the protection and creation of new modern protection technologies of specialties and documents from counterfeiting, as well as materials and means of protection» (code «Document Security», 2006-2007) were proposed and developed (the research supervisor - Candidate of Physics and Mathematics Sciences L.V. Tanin)

10. Innovative, original means of complex national protection that contains the global priority (unigram and codogram) were proposed, developed and patented from theoretical and experimental research to industrialization.

11. In the Republic of Belarus national means of protection were developed and implemented which are completely distinguished in their scientific novelty, uniqueness, originality, with the use of their long-run production based on its own patented technologies.

12. In the enterprises of the Department of State Marks of the Republic of Belarus national means of protection (unigram and codogram) were introduced in the production of excise stamps, the control (identification) signs, transportation documents, diplomas of higher education.

13. New technologies and means of holographic protection – holographic laminates for passports and driving licenses that solves the problem of import substitution.

14. New holographic means of protection with great export potential – foil hot stamping, blister package of certified diamonds, holographic stickers were developed, industrialized and implemented. Among the consumers of holographic products are: Azerbaijan, Nepal, Moscow assay office, Smolensk Gemological center for certification of diamonds, Krasnoselskaya jewellery industry, the mints of St. Petersburg, Kazakhstan, Lithuania.

15. The Quality Management System (QMS) of holographic products ISO-9001 manufactured by the company «Holography Industry» was created and implemented. It is confirmed by the certificate STB ISO 9001-2009, issued by the State Committee for standardization of the Republic of Belarus.

16. In cooperation with JSC «S.I.Vavilov BelOMA-MMZ» multifunctional identifier of holographic protective elements was developed and patented in Russia and Belarus and its volume production was set up.

17. Together with the Belarusian State University hardware and software complex of holographic protective elements in the process of volume production was designed, developed and implemented in JSC «Holography Industry» as part of the state scientific technical program «Identification».

18 By the example of the company JSC «Holography Industry» the idea based on the creation of a knowledge-intensive enterprise in the form of closed joint-stock company was proposed and realized, including both public and private enterprises, the enterprises of two forms in particular: state and private, which allows to increase the efficiency and decision-making aimed at the development and implementation of scientific results.

19. The effectiveness is confirmed by reducing illegal «shadow» turnover of goods, materials and financial flows, ensuring the full volume of the collection of taxes, which is one of the elements of national and economic security of the Republic of Belarus.

20. A unique scientific school of specialists in the field of holography, which unites researchers and manufacturers, is established in the Republic of Belarus.

The results of theoretical and experimental researches are protected by 50 patents and inventor's certificates both in our country and abroad, were published in 56 scientific papers and presented at such International conferences as: «Holopack-Holoprint», Cross, USA, FL, 1997; Vienna, Austria, 2007; China, Hong Kong 2007; «HoloExpo» – 2004-2011 Moscow, Kiev, Minsk, and were presented at numerous International exhibitions: in Finland (Helsinki, 1980) «The Soviet Holography»; in Austria (Vienna 1981) «Holography in the USSR»; in Denmark (Copenhagen 1983) «Holography, Lasers»; UK (London 1985) «Holography in the USSR»; Japan (Tsukuba 1985) «EXPO-85», Australia (Brisbane, 1988) «EXPO – 88, Science and technology of the XXI century»; the Republic of Belarus (Minsk, 1991) «Holography – 1991»; the Republic of Belarus (Zhodino, 2007) «Holography-2007» Astana (2012) «Holography-2012», Gomel (2013) «Holography-2013», Vitebsk (2012) «Holography-2012», Minsk (2014) «Holography-2014», Zhodino (2015) «Holography-2015»; and specialized exhibitions on protective holography «HoloExpo» 2007-2011 (Moscow, Kiev, Minsk) and others.

The company was awarded with certificates and diplomas at various International conferences and exhibitions. Among the awards are: the award in the nomination «For the development of innovative technologies aimed at protecting goods of food market of the Republic of Belarus» in the Xth and XI Republican contest «Product of the year 2007», «Product of the year 2008» (Minsk, Republic of Belarus, 2007, 2008); international award in the category «Packaging» at the international conference held by the organizing Committee of the International Association of security hologram manufacturers «Holopack-Holoprint 2008» for blister packaging of certified diamonds with a holographic insert (Toronto, Canada, 2008); international Golden Award for the best trade name of new Millennium (Paris, France, 2009); international award «The Best Enterprises» for the dynamic growth of the company in its branch of industry at the International conference «The EU and CIS. Experience and prospects of economic cooperation in the conditions of global financial and economic crisis. Business interests» (Vilnius, Lithuania, 2009); international Europe award «For quality» (Madrid, Spain, 2009); Crystal Grand Prix of the XII Republican contest «Product of the year 2009» (Minsk, Republic of Belarus); award of the European organization European Society for Quality Research-ESQR (European Society of Research Quality) – the prize «European Award for Best Practices 2011» (European Award for Best Practices 2011), awarded to the companies from all over the world for achieving significant results in the field of quality and for the implementation of modern quality management methods (Brussels, Belgium, 2011), International Award for Quality and Technology Arch of Europe», Frankfurt, 2012; prizewinner of the competition «The best entrepreneur of Minsk-2012» in the field of innovation; the certificate of entering on the board of honour (Pervomaisky district, Minsk) for the best results of the year 2014 in meeting the forecast targets of the socio-economic development.

ГОЛОГРАММНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ КАФЕДРЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КНИТУ-КАИ

Раковец С.В.

(ОАО «Казанский оптико-механический завод», г. Казань)

Кафедра оптико-электронных систем (ОЭС) была создана в Казанском авиационном институте (сейчас Казанский национальный исследовательский технический университет) в 1990 году как базовая кафедра по подготовке специалистов для Казанских предприятий оптико-электронного приборостроения – ОАО «Казанский оптико-механический завод», ОАО НПО «Государственный институт прикладной оптики» и Центрального конструкторского бюро «Фотон» (ныне ОАО «Швабе – технологическая лаборатория»). За это время кафедра сделала 25 выпусков специалистов по оптико-электронным приборам как по дневной, так и по вечерней формам обучения, а также бакалавров и магистров. Многие из наших выпускников работают на ОАО КОМЗ, ОАО НПО ГИПО, ОАО «Швабе – технологическая лаборатория».

Среди наших выпускников – главный инженер и главный технолог ОАО КОМЗ, начальники производств ОАО КОМЗ, главный технолог ОАО НПО ГИПО, заместитель генерального директора ОАО «Швабе – ТЛ», начальники отделов и секторов предприятий, ведущие специалисты.

В настоящее время кафедра осуществляет подготовку бакалавров и магистров по направлению подготовки – Опотехника, а также аспирантов по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы. Вопросы, связанные с голограммными технологиями, изучаются в ряде учебных дисциплин – Прикладная оптика, Оптическая голография, Оптические методы и приборы для научных исследований.

Проектирование, моделирование и применение голограммных оптических элементов рассматриваются в следующих учебных дисциплинах:

– пакеты прикладных программ в Опотехнике, где практикум по моделированию и оптимизации оптических систем включает рассмотрение дифракционных решеток, синтезированных голограммных элементов с бинарным профилем и голограммных элементов, записываемых точечными источниками.

– исследование и контроль качества оптического изображения оптико-электронных систем, где большое место в теоретическом курсе дисциплины уделено методом исследования и контроля оптических систем и компонентов с использованием голографических компенсаторов – как физических, так и синтезированных.

Голограммные технологии и использование голограммных элементов в оптико-электронном приборостроении являются одними из направлений научных исследований кафедры. Под руководством д.т.н., профессора Н.К. Павлычевой подготовлены кандидаты технических наук:

– Вендеревская Ирина Геннадьевна – «Малогобаритный спектроанализатор на вогнутой голограммной дифракционной решетке для эмиссионного анализа конструкционных сталей». Цель диссертационной работы – разработка малогабаритного спектроанализатора для анализа химического состава конструкционных сталей на основе голограммной дифракционной решетки с коррекцией аберраций и многоканальной фотоэлектрической регистрацией спектра (2003 г.);

– Белокопытов Алексей Анатольевич – «Методика расчета и технология изготовления вогнутых голограммных дифракционных решеток, записанных негомоцентрическими пучками». Цель диссертационной работы – совершенствование методов расчета, изготовления и контроля ВГДР 2-го поколения и разработка на их основе оптической системы спектрального прибора с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками (2010 г.);

– Хасан Мазен – «Оптические схемы малогабаритных спектрографов на основе вогнутых отражательных голограммных дифракционных решеток для исследования наноматериалов». Цель диссертационной работы – разработка малогабаритных спектрографов с высоким

разрешением для исследования спектральных характеристик углеродных нанотрубок, фуллеренов и квантовых точек.

– Муслимов Эдуард Ринатович – «Методики расчета оптических схем спектральных приборов на основе пропускающих вогнутых голограммных дифракционных решеток с коррекцией аберраций». Цель диссертационной работы – расширение функциональных возможностей спектральных приборов за счет использования оптических схем на основе пропускающих вогнутых голограммных дифракционных решеток.

В настоящее время аспирантка профессора Н.К. Павлычевой Ахметгалеева Раиля Рифкатовна занимается разработкой оптических схем малогабаритных спектральных приборов на основе голограммных дифракционных решеток для экологического мониторинга.

На кафедре ОЭС ведется также подготовка научных кадров по направлению научных исследований «Динамика и управление оптико-электронными приборами морского, воздушного и наземного базирования. Стабилизация качества изображения бортовых оптико-электронных систем и комплексов». Под руководством к.т.н., профессора кафедры ОЭС А.И. Карпова подготовлены кандидаты технических наук:

– Михалицын Андрей Владимирович – «Моделирование и синтез трехдвигательной системы управления панорамного аэрофотоаппарата»,

– Молин Дмитрий Александрович – «Методика и алгоритмы имитационного моделирования и рационального выбора конструктивных параметров бортовой оптико-электронной системы кругового обзора и слежения»

По направлению научных исследований «Оптические технологии» защищена кандидатская диссертация Мельниковым Андреем Николаевичем

В настоящее время аспиранты профессора А.И. Карпова Чижиков М., Смирнов А., Бурдинов К. занимаются разработкой и исследованием алгоритмов управления, систем амортизации ботовых комплексированных оптико-электронных приборов, базируемых на вертолетах, самолетах и беспилотных летательных аппаратах.

В научных исследованиях, связанных с голограммными технологиями, победителями программы грантов УМНИК Фонда содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере в разные годы были студенты:

– Муслимов Э.Р. «Исследование функциональных возможностей пропускающих вогнутых голограммных дифракционных решеток и создание двухканального спектроанализатора с подобной решеткой».

– Ахметгалеева Р.Р. «Разработка методики расчета оптических схем компактных светосильных S-образных спектрометров и создание опытного образца универсального спектрометра для видимой и БИК-области на базе такой схемы».

Исследование и использование голограммных оптических элементов является темой ряда студенческих научных работ, представленных на Международных и Всероссийских научных конференциях в Казани, Йошкар-Оле, Санкт-Петербурге.

Среди научно-исследовательских работ в области голограммных технологий, проводимых на кафедре, необходимо отметить следующие:

1. В период с марта 2010 г. по декабрь 2011 г. выполнялась научно-исследовательская работа «Разработка учебно-методического лабораторного комплекса «Основы дифракционной оптики и голографии» для довузовского, вузовского и послевузовского уровней подготовки» (Государственный контракт № 02.740.11.0557 от 22 марта 2010 г.). Работа проводилась в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. В ходе выполнения работы были изготовлены приборная часть комплекса, комплекты лабораторных образцов голограммных оптических элементов (ГОЭ), комплекты образцов ГОЭ по серийной технологии. Комплекты ГОЭ переданы в следующие ВУЗы РФ для проведения апробации: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Волгоградский государственный университет, Самарский госу-

дарственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Казанский государственный энергетический университет, Ижевский государственный технический университет, Казанский государственный медицинский университет Минздравсоцразвития России, КНИТУ-КАИ на кафедры общей физики, радиоэлектронных и квантовых устройств, оптико-электронных систем.

2. Опытно-конструкторская разработка «Разработка комплекта спектрофотометрического фотометра солнечного» по государственному контракту от 15 марта 2010 г. № 02/10-2 (Заказчик ГУ «НПО «Тайфун»).

В результате проделанной работы разработаны, изготовлены и переданы заказчику лабораторный и опытный образцы двухканального спектрофотометра на основе голограммных дифракционных решеток. Кроме этого, за последние годы кафедрой ОЭС были выполнены хозяйственные работы по другим научным направлениям: «Разработка, изготовление и исследование лабораторного образца оптико – электронного измерителя количества электроэнергии», (совместно с кафедрой) «Теоретической и прикладной механики», «Синтез алгоритмов управления и исследование динамики системы панорамирования и систем лентопотяжки аэрофотоаппарата» и «Создание имитационной модели устройства сканирования обзорно-поисковой системы».

Сотрудники, аспиранты и студенты кафедры принимают активное участие в работе оптических обществ:

- оптического общества им. Д.С. Рождественского;
- международного общества оптики и фотоники SPIE;
- американского оптического общества OSA;
- европейского оптического общества EOS.

Сотрудники, аспиранты и студенты кафедры принимали участие в ряде престижных Международных конференций, например, World of Photonics Congress, Мюнхен, 2013, Summer Session on Optical Engineering Design and Manufacturing, Чанчунь, Китай, проходили стажировку в ведущих ВУЗах Европы – Telecom Bretagne (Брест, Франция), Institut d'Optique – Graduate School (Палезо, Франция), Technische Universitat Ilmenau (Германия).

Для проведения исследований в области дифракционной оптики и голографии кафедрой ОЭС совместно с ОАО «НПО ГИПО» организован Научно-образовательный центр «Методы, средства и технологии дифракционной и асферической оптики как элементной базы оптического приборостроения, лазерной техники и оптоэлектроники».

HOLOGRAPHIC TECHNOLOGIES IN EDUCATIONAL PROCESS AND RESEARCH DEPARTMENT OPTOELECTRONIC SYSTEMS KNRTU-KAI

Rakovets S.V.

(Kazan National Research Technical University AN Tupolev (KNRTU-KAI), Kazan)

Department of optical electronic systems has been created in the Kazan Aviation Institute in 1990 as a base department for training specialists for the enterprises of Kazan opto-electronic instrument.

Issues related to the holographic technology are studied in a number of disciplines and is one of the directions of scientific research. On this topic successfully defended some candidate dissertations, made student research work. Employees of the department carried out several research works, resulting in sets of samples were fabricated holographic diffraction elements and a two-channel spectrophotometer based on holographic diffraction gratings. The staff, graduate students and students of the department take an active part in the work of these optical companies:

- Russian Optical Society;
- International Society of Optics and Photonics SPIE;
- American Optical Society OSA;
- European Optical Society EOS.

КВАНТОВАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО ЭХА: ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Моисеев С.А.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Работы по созданию универсального квантового компьютера и реализации оптических квантовых коммуникаций на большие расстояния стимулировали разработку оптической квантовой памяти. На этом пути в последнее десятилетие был достигнут большой прогресс, вылившийся в появлении ряда перспективных подходов, продемонстрировавших обнадеживающие экспериментальные результаты [1,2]. Вскоре выяснилось, что наибольший интерес представляет многокубитовая память, в том числе для создания оптического квантового репитера, где необходимо иметь возможность работать с большим числом фотонных кубитов. В классическом пределе это подразумевает высокоточное сохранение большого числа световых импульсов в одной ячейке квантовой памяти с последующим считыванием любого из этих импульсов в заданный момент времени. В этой связи большие надежды связываются с оптической квантовой памятью, использующей принципы фотонного эха [3, 4], которая успешно была продемонстрирована в ряде экспериментов [5], в том числе при запоминании от единиц до тысячи световых импульсов [6].

Отметим, что возможность использования фотонного эха для запоминания классических световых полей, обладающих сложной временной (многоимпульсной) и пространственной структурой (сложным волновым фронтом) была показана в работах [7, 8, 9, 10] много раньше работ по оптической квантовой памяти, что в 80-х годах вызвало волну интереса к разработке динамической эхо-голографии. Эффективность рассматриваемых в этих работах схем двух- или трех-импульсного фотонного эха была низкой в силу отсутствия высокой обратимости в динамике восстановления исходного светового поля. Разработка и экспериментальная демонстрация новых высокоэффективных схем фотонного эха [4], способных с высокой эффективностью сохранять квантовые состояния отдельных фотонов для решения задач квантовой памяти поднимает в настоящее время вопрос о реализации квантовой эхо-голографии. Эти вопросы рассматриваются в настоящей работе. В первую очередь наше внимание обращено на схему фотонного эха, где неоднородное уширение линии атомного перехода контролируется за счет использования управляемого внешнего градиента электрического, или магнитного поля [4, 5]. Для этой схемы рассматриваются возможности запоминания и высокоточного воспроизведения квантового состояния светового импульса, обладающего сложной (неплоской) пространственной структурой волнового фронта, задающего трехмерное изображение некоторого объекта. Изучается ряд свойств данного способа сохранения объектного импульса света в произвольном квантовом состоянии с небольшим числом фотонов и обсуждаются возможности реализации квантовой эхо-голографии за счет использования других схем квантовой памяти на фотонном эхе. В конце мы сравниваем возможности квантовой эхо-голографии с другими подходами, предложенными недавно на основе использования взаимодействия света с когерентными атомными системами [11, 12].

PHOTON ECHO QUANTUM HOLOGRAPHY

Moiseev S.A.

(Quantum Center, Kazan National Research Technical University)

Intensive works on the creation of universal quantum computer and long-distance optical quantum communication spurred the development of optical quantum memory (QM). Along this way in the last

decade there has been much progress, which resulted in the elaboration of a number of promising approaches demonstrating encouraging experimental results [1,2]. Herein, it soon became clear that the multi-qubit QM has the greatest interest for the quantum computing and even for the optical quantum repeater, where one can need to work with a quite large number of photonic qubits. In the classical limit, this implies perfect storage of a large number of the light pulses in a single cell of QM for subsequent read-out of any of these pulses in a given time. In this context, the great expectations are associated now with optical QM based on the principles of reversible photon echo [3,4], which was successfully demonstrated in several experiments, including a storage of single photon fields [5] and thousands of light pulses [6].

We note that the possibility of using photon echo for storage of classical light fields with a complicated temporal (multi-pulses) and spatial structure (complex wave front) have been shown in [7,8,9,10] much more early of the works on the optical QMs. These results caused a wave of interest to the development of a dynamic echo-holography in 80-ies. The efficiency of the considered in these works schemes of two – or three-pulse photon echo was too low due to the lack of high reversibility in the light-atoms dynamics at the echo field emission. Development and experimental demonstration of a new highly efficient photon echo schemes [4], which are able for highly efficient preserving the quantum state of individual photons, raises now the question for the implementation of quantum echo-holography. These issues are discussed in this report. In the first place, our attention is drawn to the scheme of photon echo QM, where the inhomogeneously broadened line of the atomic transition is controlled through the use of external gradient of the electric or magnetic field [4,5]. For this scheme, we consider the possibility for storage and precision retrieval of the quantum state of the light pulse with a complex spatial structure of the wave front, which determines a three-dimensional image of some object. Some basic properties of this technique are studied for preserving the object light field in an arbitrary quantum state with a small number of photons. We also discusses the possible implementation of quantum echo-holography by using some other schemes of the photon echo QM. In the end, the opportunities of the quantum echo-holography are compared with the properties of the approaches proposed recently on the basis of another coherent interaction between the light and atomic systems [11, 12].

REFERENCES

1. Hammerer K., Sørensen A.S. and Polzik E.S., Rev. Mod. Phys. 82, 1041 (2010).
2. Simon C. et al., Eur. Phys. J. D 58, 1 (2010).
3. Moiseev S.A. and Kröll S., Phys. Rev. Lett. 87, 173601 (2001).
4. Tittel W. et al., Laser and Phot. Rev. 4, 244 (2010).
5. Usmani I. et al., Nat. Commun. 1, 1 (2010).
6. Bonarota M., J.-L. Le Gouet and Chaneliere T., New J. Phys, 13, 013013 (2011).
7. Elyutin S.O., Zakharov S.M. and Manykin E.A., Sov. Phys. JETP 49, 421 (1979).
8. Zuikov V.A., Samartsev V.V., and Usmanov R.G., Pis'ma v Zh. Eks. Teor.Fiz., 32, No.4, 293 (1980).
9. Mossberg T.W., Opt. Lett. 7, 77 (1982).
10. Shtyrkov E.I., Lobkov V.S., Moiseev S.A. and Yarmukhametov N.G., Zh. Eksp. Teor.Fiz. 81, 1977 (1981).
11. Samburskaya K., Golubeva T., Golubev Yu. and Giacobino E., Opt. and Spectr. 110, 775, (2011).
12. Gerasimov G.V., Sokolov I.M., Kupriyanov D.V., Havey M.D., Phys J.B. At. Mol. Opt. Phys. 45, 124012 (2012).

HOLOGRAPHIC WAVEFRONT SENSORS

Venediktov V.Y.

*(St.-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»,
St. Petersburg)*

Today the wavefront sensors (WFS), i.e. the devices, providing fast (refreshment rate up to 1 kHz) evaluation of wavefront deformations, are widely used in adaptive optics, ophthalmology, optical industry etc. The corresponding market today is preoccupied by the well-known Shack-Hartman sensors [1]. In such devices the tilts of the subaperture segments of the wavefront are evaluated from lateral displacements of the corresponding focal points, produced by beam focusing by the microlens array (lenslet) onto matrix photosensor. Thus obtained data is used for evaluation of the wavefront distortions, which are represented most usually as the expansion along Zernike polynomials.

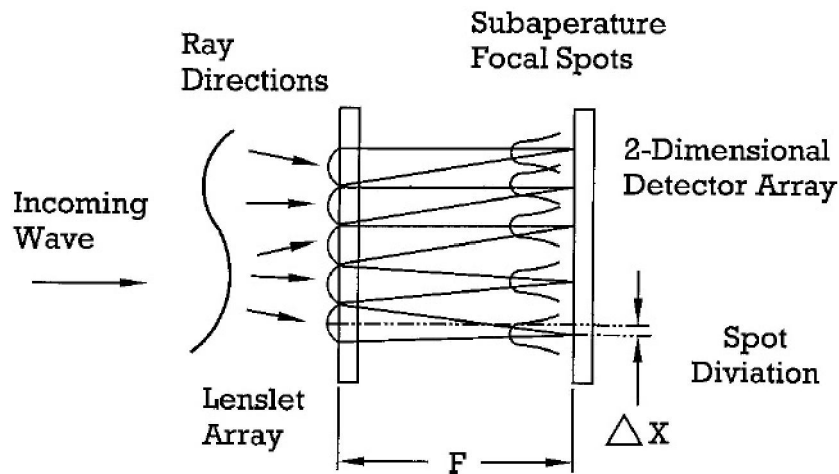


Fig.1. Principle of Shack-Hartmann wavefront sensor performance [1]

However, the last several years have brought fast progress in the field of the so-called holographic WFS – the devices, which are based on the use of holographic optical elements (HOE). One can roughly distinguish three architectures of such devices: (a) modified Shack-Hartman or other standard devices, using the HOE optics; (b) systems with holographic filtration of wavefront aberration components (modal holographic wavefront sensors); and (c) devices with zonal filtration (zonal holographic wavefront sensors).

Even the trivial implementation of HOE technology in lenslet production [2] simplifies the corresponding technology, makes it cheaper and more reliable. The use of bifocal HOE elements [3] makes it possible to enlarge the dynamic range of measurements of the Shack-Hartmann WFS. Namely, it is well known that the larger is the focal length of lenses in the array, the higher is the accuracy of measurements, but also the smaller is the maximal depth of measured distortions. The use of bifocal lenses makes it possible to comprise in one device two channels of measurements – one with the large focal length for high accuracy measurements and another with the shorter one with wider dynamic range.

Bifocal HOE lenslets also make it possible to employ the principles of the curvature WFS in the device with one photosensitive matrix. In the usual curvature WFS [4] there are used two arrays. One is placed before the focal plane of lenslets, while another one is placed beyond it. Comparison of subaperture spot diameters in two planes makes it possible to evaluate the curvature of subaperture

wavefront segments. However, one can show that the use of bifocal lenslets provides an opportunity to judge about the subaperture curvature from the integral intensity of overlapping prefocal and overfocal spots.

One can also use HOE optics for direct selection of Zernike polynomials, accompanied by direct measurement of the amplitude coefficient in aberration expansion across the set of Zernike polynomials. If one records the hologram as the interference pattern of spherical converging wave and of the wave, whose wavefront corresponds to one of Zernike polynomials with the given amplitude, he can then use this hologram for direct and quick estimation of amplitude of the same component in the unknown incoming wave. In accordance with the properties of holograms, the hologram, illuminated by the distorted wave will select from this wave only the component with the same Zernike polynomial (other components will diffract to halo noise), and reconstruct the converging wave. The lateral position of the convergence point will be the measure of the Zernike polynomial amplitude. The same idea can be realized by two superposed holograms, corresponding to different points of converging and to maximal positive and negative values of Zernike polynomial [5,6] (Fig. 2).

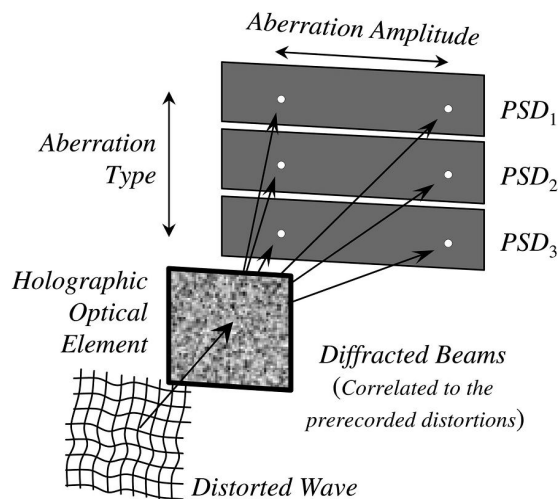


Fig. 2. Reconstruction of holographic multiplex, corresponding to several Zernike polynomials, by the distorted wave [5]

This approach, however, is not free from problems. The straightforward overlapping of several HOE results in the so-called cross-modulation noise, when diffraction on HOE occurs not only for its "own" distortion, but also for the "alien" one. Probably, the sophistication of the HOE architecture and design will make it possible to reduce this effect, but there is also another solution of this problem. The above described scheme can be called the modal one, because the system directly measures the strength of various modes of wavefront distortions. In the case, when adaptive optical system comprises the modal corrector (e.g., the bimorph flexible mirror etc.) this approach is more convenient than the use of zonal WFS like Shack-Hartman WFS etc. However, in the case when the zonal corrector is employed one can record the holograms, corresponding to deformable mirror in its two states, corresponding to maximal positive and negative shifts (Fig. 3), induced by this or that actuator of the mirror. Such a system was realized in experiment HALOS [8], where was shown the adaptive optical system with feedback loop, lacking the computation techniques and working in purely analogous way (Fig. 4).

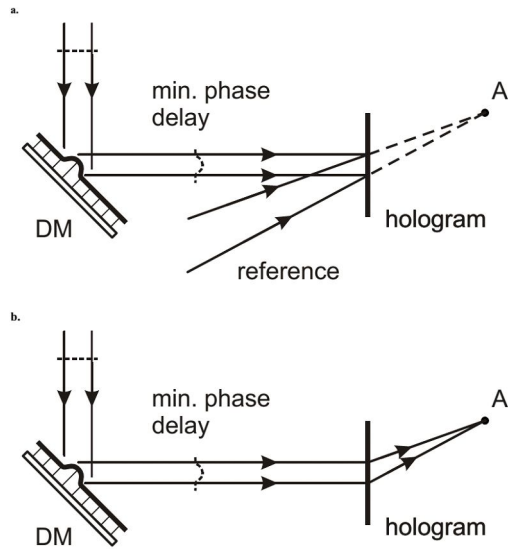


Fig. 3. The record of HOE, corresponding to zonal distortions [7]

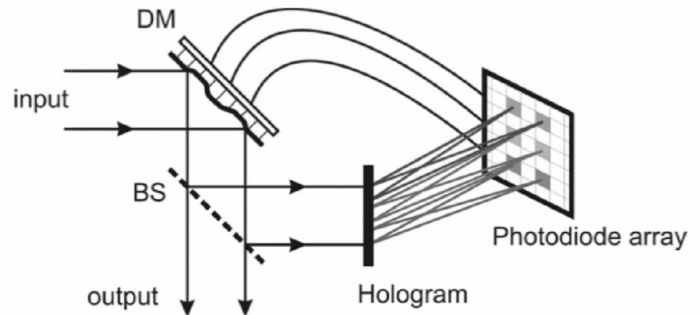


Fig. 4. Fast and simple computation-free adaptive system HALOS [8]

One can expect that sophistication of HOE technologies and solving the cross-talk problem will open a new era in WFS and adaptive optics technologies, based upon advance holographic WFS.

REFERENCES

1. Platt, Ben C.; Shack, Ronald (October 2001). History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing. *Journal of Refractive Surgery* 17 (5).
2. Lukin V.P. et al. Shack-Hartmann Sensor Based on a Low-Aperture Off-Axis Diffraction Lens Array. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009. – Vol. 45, No. 2. P. 161-170.
3. Son, J., et al., Shack-Hartmann wavefront sensor with holographic memory. *Opt. Eng.* 42, 3389-3398, 2003.
4. Roddier, François (1988). Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics. *Applied Optics* 27 (7): 1223-1225.
5. Ghebremichael, F., Andersen, G., Gurley, K. Holography-based wavefront sensing. *Appl. Opt.* 47, A62-A70, 2008.
6. Andersen, G., Dussan, L., Ghebremichael, F., Chen, K. Holographic wavefront sensor. *Opt. Eng.* 48, 085801, 2009.
7. Andersen, G. *Holographic Adaptive Optics*. 2009.
8. Andersen, G., Ghebremichael, F., Gelsinger-Austin, P., MacDonald, K., Gaddipati, R., Gaddipati, P. Fast Autonomous Holographic Adaptive Optics. *Third AO4ELT Conference, AO4ELT3.19098*, 2013.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМ

Скиданов Р.В.^{1,2}, Морозов А.А.¹, Хонина С.Н.^{1,2}, Казанский Н.Л.^{1,2}

(¹ Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва)

Аннотация

Проведен натурный эксперимент по формированию изображения идеальной дифракционной линзой. Проведено сравнение с параболической дифракционной линзой.

Введение

Использование асферических рефракционных линз позволяет получить изображающие системы с высоким качеством изображения, т.к. введение асферической линзы в объектив позволяет минимизировать большинство геометрических aberrаций. К сожалению, процесс изготовления асферических рефракционных линз высокого качества весьма трудоемок, вследствие этого асферическую рефракционную оптику нельзя использовать в массовых дешевых устройствах. С другой стороны изготовление дифракционных аналогов асферических линз по трудоемкости ничем не отличается от изготовления дифракционных аналогов сферических линз. Однако использование только дифракционных линз для изображающей оптики затруднено из-за высокой хроматической aberrации [1-7]. Поэтому в настоящее время дифракционные линзы используются либо в системах, где используется одна длина волны [8, 9], либо только для компенсации хроматической aberrации рефракционных изображающих систем [10-13]. В некоторых случаях с помощью дифракционной линзы компенсируют не только хроматические aberrации, но и часть геометрических aberrаций рефракционной изображающей системы [11]. Для этого необходимо использовать, существенно асферические линзы.

Эксперимент

В настоящей работе рассматривается расчет фазовой функции аксикона с изменяющимся периодом, которая была рассчитана для фокусного расстояния 160 мм на длину волны 550 нм, для апертуры диаметром 8 мм. Такая линза была изготовлена методом прямой лазерной записи по фоторезисту на станции лазерной записи. На рис. 3 представлен вид рельефа в центральной области линзы (рис. 3, а) и краевой области линзы (рис. 3, б).

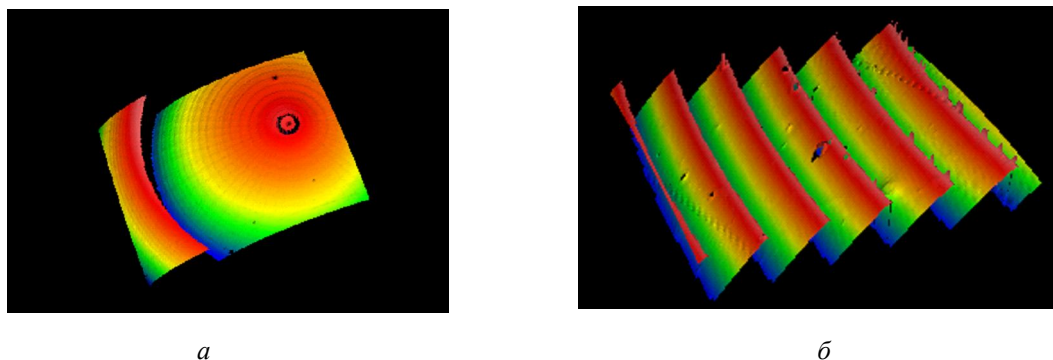


Рис. 1. Вид центрального (а) и краевого участком микрорельефа дифракционной линзы (б)

Как видно из рис. 1 получившийся микрорельеф хорошего качества без сбоев и неоднородностей.

После изготовления аксикон (дифракционная линза) был установлен в оптическую схему, представленную на рис. 2, в которой был проведен эксперимент по формированию изображения этим элементом.

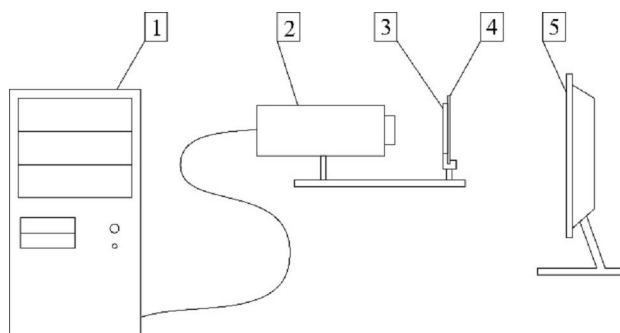


Рис. 2. Оптическая схема, позволяющая строить изображения с помощью дифракционных линз:
1 – компьютер; 2 – CCD камера; 3 – диафрагма; 4 – дифракционная линза; 5 – монитор

Для исследования хроматических aberrаций было использовано изображение файловой таблицы, которое непосредственно выводилось на монитор компьютера (рис. 3, а). Для сравнения такое же изображение было сформировано с помощью дифракционной параболической линзы с такими же параметрами (рис. 3, б).

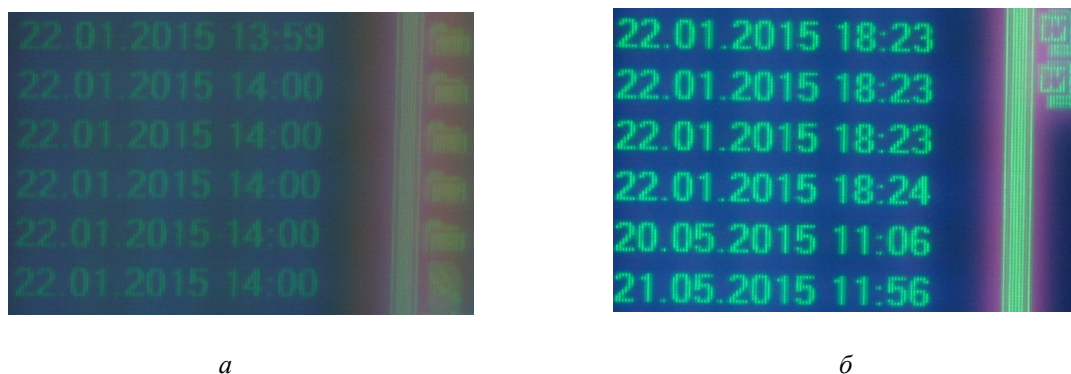


Рис. 3. Изображение рабочего окна программы Windows Comander, снятое с экрана монитора дифракционной идеальной линзой (а) и дифракционной параболической линзой (б) с фокусными расстояниями 160 мм с расстояния 2 м

Поскольку основное изображение файловой таблицы почти монохромно, то обе дифракционные структуры довольно качественно строят изображения. Но на изображении присутствует вертикальная линия белого цвета, которая содержит все RGB компоненты и поэтому вдоль нее на изображении мы видим довольно широкую цветную полосу. Очевидно что по ширине этой полосы можно оценить величину поперечной хроматической aberrации каждой из дифракционных структур. Так для рис. 3, а ширина этой линии 400 мкм, а для рис. 3, б – 260 мкм. Т.е. дифракционный аксикон с переменным периодом дает хроматическую aberrацию в полтора раза больше чем параболическая линза. Эта aberrация как видно из рис.3 полностью нивелирует эффект от уменьшения геометрических aberrаций. И на той и на другой картинке видны межпиксельные промежутки размером 0,2 мм. Но при съемке в монохроматическом режиме когда светофильтрами отсекается область спектра от 470 нм до 520 нм, влияние хроматической aberrации уменьшается рис. 4.

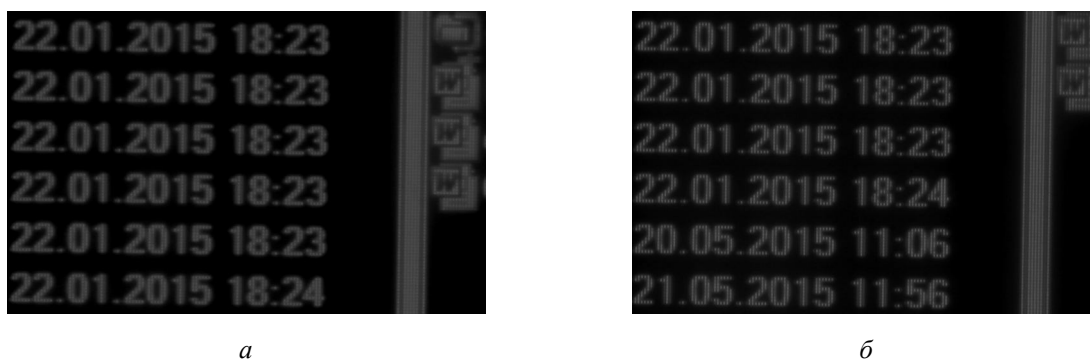


Рис. 4. Изображение рабочего окна программы Windows Comander, снятое с экрана монитора дифракционной идеальной линзой (а) и дифракционной параболической линзой (б) с фокусными расстояниями 160 мм с расстояния 2 м, при съемке в монохроматическом режиме

Как видно из рис. 4 по разрешающей способности идеальная линза сравнялась с линзой параболической, но контраст изображения, полученного с ее помощью все же ниже чем контраст изображения, полученного параболической линзой.

Заключение

Проведен расчет дифракционной идеальной линзы, которая обеспечивает фокусировку в одну точку. По результатам проведенных теоретических расчетов и натурального эксперимента можно сделать вывод, что наличие повышенно хроматической аберрации у идеальной дифракционной линзы полностью нивелирует эффект от компенсации части геометрических аберраций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-31-00014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dobson, S.L.* Diffractive lenses for chromatic confocal imaging / S.L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // APPLIED OPTICS, 1997. – V. 36. – N. 20. – P. 4744-4748.
2. *Грейсух, Г.И.* Принципы построения проекционных и фокусирующих оптических систем с дифракционными элементами / Г.И. Грейсух, И.М. Ефименко, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 1987. – Т. 1. – С. 114-116.
3. *Greisukh, G.I.* Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov // APPLIED OPTICS, 2001. – V. 40. – No. 16 2001. – P. 2730-2735.
4. *Buralli, D.A.* Design of diffractive singlets for monochromatic imaging / D.A. Buralli, G.M. Morris // Applied Optics, 1991. – V. 30. – P. 2151-2158.
5. *Sweeney, D.W.* Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics, 1995. – V. 34. – N. 14. – P. 2469-2475.
6. *Falkis, D.* Broadband Imaging with Holographic Lenses / D. Falkis and G. M. Morris // Optical Engineering, 1989. – N 28. – P 592-598.
7. *Buralli, D.A.* Design of a Wide Field Diffractive Landscape Lens / D. A. Buralli, G. M. Morris APPLIED OPTICS, 1989. – V. 28. – P. 3950-3959.
8. *Kleinhans, W.A.* Aberrations of curved zone plates and Fresnel lenses / W. A. Kleinhans // Applied Optics, 1977. – V. 16. – P. 1701-1704.
9. *Hopkins, R.E.* Optics for Laser Scanning / R.E. Hopkins, M.J. Buzawa // Optical Engineering, 1976. – V. 15. – P. 90-94.
10. *Missig, M.D.* Diffractive optics applied to eyepiece design / M. D. Missig, G. M. Morris // Applied Optics, 1995. – V. 34. – P. 2452 (1995).

11. *Knapp, W.* Optical design comparison of 60 degrees eyepieces: one with a diffractive surface and one with aspherics / W. Knapp, G. Blough, K. Khajurivala, R. Michaels, B. Tatian, B. Volk // *Applied Optics* – 1997. – V. 36. – P. 4756-4760.
12. *Yun, Z.* Eyepiece design with refractive-diffractive hybrid elements / Z. Yun, Y. Lam, Y. Zhou, X. Yuan, L. Zhao, J. Liu // *Proc. SPIE* – 2000. – 4093. – P. 474-480.
13. *Stone, T.W.* Hybrid Diffractive-Refractive Lenses and Achromats / T. W. Stone, N. George / *Applied Optics*, 1988. – V. 27. – P. 2960-2971.
14. *Haefner, M.* Laser direct writing of rotationally symmetric high-resolution structures / M. Haefner, C. Pruss, W. Osten // *Applied Optics*, 2011. – V. 50. – P. 5983-5989.

DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR IMAGING SYSTEMS

Skidanov R.V.^{1,2}, Morozov A.A.^{1,2}, Khonina S.N.^{1,2}, Kazanskiy N.L.

(¹Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,

²S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Conducted experiment on the formation of the image of the ideal diffraction lens. Compared with parabolic diffraction lens.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ШКАЛ, СЕТОК, ФОТОШАБЛОНОВ И СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МИКРО И НАНООБРАБОТКИ

*Полецук А.Г.¹, Корольков В.П.¹, Бессмельцев В.П.¹, Никоноров Ю.Н.², Карван А.Л.²,
Верхогляд А.Г.³*

¹ *Институт автоматики и электрометрии СО РАН;*

² *ОАО «Швабе – Оборона и Защита»;*

³ *Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Россия)*

Комплекс предназначен для трехмерной прецизионной микро обработки изделий оптического и полупроводникового производства для серийного производства оптических и оптико-электронных приборов наблюдения прицеливания, а также угло-измерительных устройств с цифровым отсчетом, в том числе нанесения сеток и шкал на изделия из стекла, на основе технологий лазерного формообразования с помощью мощных фемто, пико секундных и непрерывных лазеров.

Разработка проведена в рамках проекта Министерства образования и науки Российской Федерации «Создание гибкого производства оптических и оптико-электронных приборов нового поколения на основе лазерной трехмерной микрообработки оптических компонентов и нанесение многослойных диэлектрических покрытий со слоями нанометровой толщины», шифр 2012-218-03-004. Его особенностью являются: высокие точностные характеристики, высокое быстродействие универсальность и гибкость благодаря использованию встроенных оптических датчиков и измерительных систем, оригинального аппаратно-программного обеспечения и многоканальных лазерных модулей, работающих в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне, что позволяет использовать для формирования фотошаблонов и 3D микрообработки широкую гамму лазерных технологий и материалов.

В состав комплекса входят: «Лазерная технологическая рабочая станция на основе лазера с перестраиваемой длительностью импульсов (фемто – пико) – для микрообработки заготовок из оптического стекла и кристаллов, а также заготовок из оптического стекла с металлическим напылением и металлических фольг, с оснасткой для быстрой смены заготовок серийных изделий» (ФПЛ); «Круговая прецизионная лазерная записывающая система для изготовления микроструктур различного назначения, описанных в полярной или прямоугольной системах координат» (КЛЗС); «Сканирующий профилометр на основе хроматических конфокальных датчиков для контроля качества изготавливаемых микроструктур» (СП). Структура комплекса представлена на рис. 1.

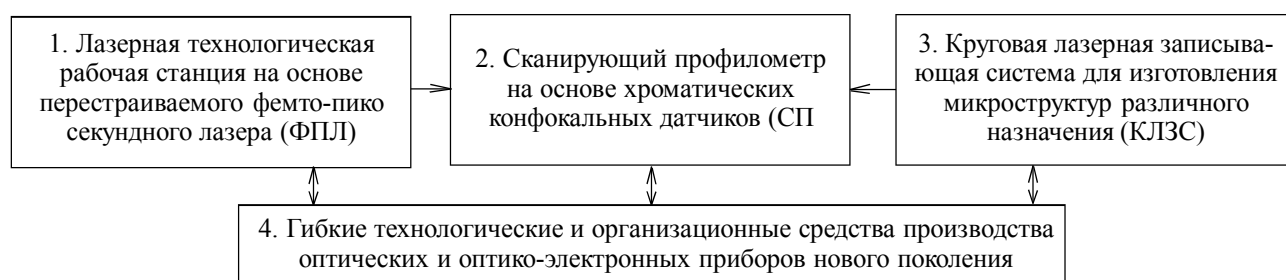


Рис. 1. Структура технологического комплекса прецизионной обработки оптических элементов, (лазерного формирования сеток, масок, шкал, лимбов)

Лазерная рабочая станция ФПЛ на основе технологического фемтосекундного лазера генерирующего три длины волны 1030, 515 343 нм, включает в себя трехканальную систему формирования и позиционирования сфокусированного лазерного излучения на основе комплементарной системы управления положением лазерного луча, содержащую в каналах 1030нм и 515 нм блоки быстрого сканирования на основе прецизионных сканеров с объективами плоского поля (поле 6,10 мм²). Блоки быстрого сканирования и фокусировки расположены на каретке механизма вертикального перемещения Z. Обрабатываемые детали располагаются на рабочем столе механизма прецизионного (дискретность 50 нм), двух координатного привода X, Y с полем 200 x 200мм. Запись может проводиться в режиме последовательного формирования полной зоны обработки в стартстопном режиме и, также, при непрерывном движении рабочего стола, что обеспечивается специальным контроллером на базе чипа с ARM9 и FPGA на кристалле. Контроллер управляет составной мульти-координатной системой в реальном времени при движении лазерного луча со скоростью более 1 м/с с динамической ошибкой менее 100нм по всему полю обработки.

ФПЛ предназначен для лазерной микрообработки оптико-механических деталей и изделий из металла, керамики, кристаллических материалов и оптического стекла путем лазерной трехмерной обработки поверхности, резки, и регулируемой объемной оптической модификации прозрачных материалов.

Основные технические характеристики:

Способ сканирования	растровый, векторный	
Максимальная скорость обработки, мм/с		до 1000
Максимальный размер зоны обработки, мм, не менее		200x200x100
Минимальная дискретность позиционирования, нм, не более		50
Воспроизводимость, нм, не более		150
Минимальная ширина гравированной линии, мкм,		3

На рис. 2, *a* представлен внешний вид ФПЛ (без защитных кожухов), *б* – изображения элементов сеток полученных на рабочей станции: на поверхности стекла, в глубине стекла, полученных микро резкой металлических фольг.

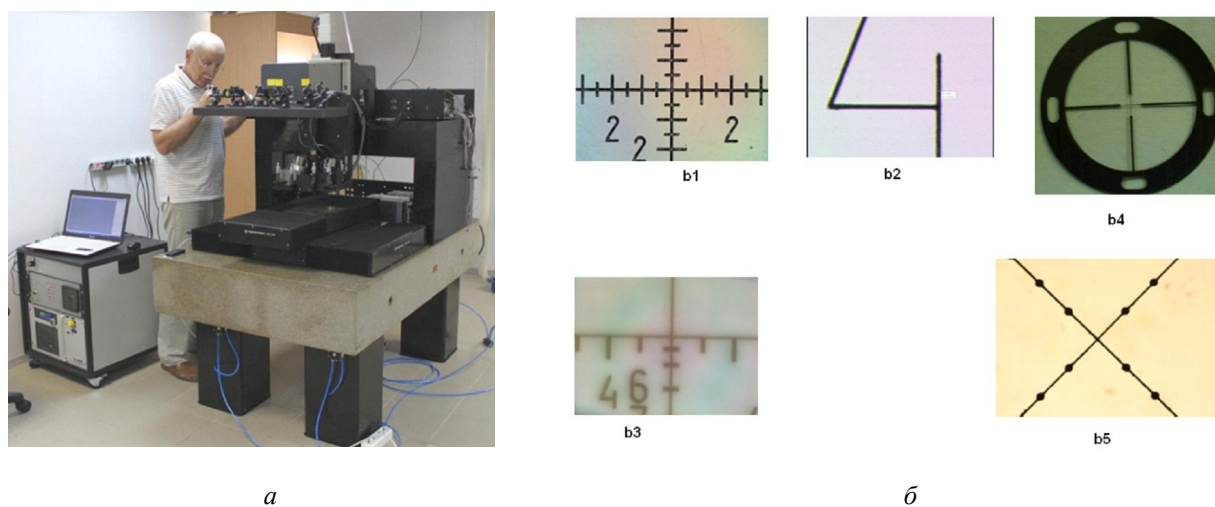


Рис. 2. *a* – внешний вид ФПЛ (без защитных кожухов), *б* – элементы сеток:

- b1 – на поверхности стекла размер линий 12 мкм, глубина 7 мкм;
- b2 – толщина линии 3 мкм, глубина 3 мкм;
- b3 – в глубине стекла на расстоянии 80 мкм от поверхности, ширина линии 10 мкм;
- b4 – микрорезка металлической фольги толщиной 100 мкм, размер объекта 20 мкм, толщина «проволки» 20 мкм;
- b5 – увеличенный центральный фрагмент изделия фиг

Принцип работы КЛЗС основан в формировании сфокусированным лучом лазера высокой мощности скрытых изображений в светочувствительных слоях. Запись изображений осуществляется путем пошагового перемещения записывающего лазерного пучка по радиусу непрерывно вращающейся подложки со светочувствительным слоем и синхронизированной с вращением модуляции мощности пучка под управлением компьютера.

В качестве светочувствительных слоев используются пленки фоторезиста или пленка хрома.

КЛЗС применяется для записи фотошаблонов дифракционных оптических элементов, компьютерно-синтезированных голограмм, прецизионных круговых шкал, лимбов и кодовых дисков, фотошаблонов для элементов микромеханики и интегральной оптики.

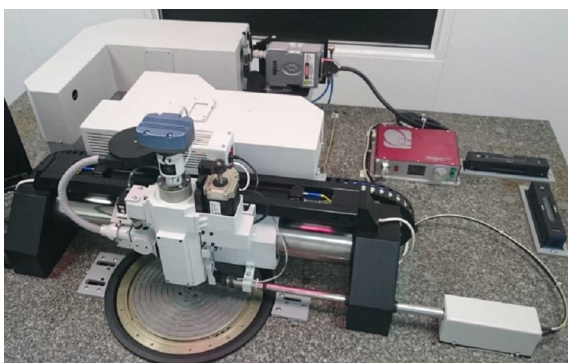
В рамках проекта создан вариант круговой записывающей системы с двумя лазерами: УФ диодным лазером – для фоторезиста и твердотельным мощным лазером с длиной волны 532 нм – для записи на хrome. Зеленый лазер используется также для записи юстировочных структур путем проплавления фоторезиста и измерения их положения.

Максимальный диаметр поля записи, мм, не менее	285
Минимальные размеры элементов записываемой структуры (поле 150 мм)	1 мкм
Минимальные размеры элементов записываемой структуры (поле 285 мм)	2 мкм
Минимальные размеры элементов записываемой осесимметричной структуры	0,6 мкм
Максимальная неравномерность ширины элементов записываемой структуры:	
на рабочем поле с диаметром до 150 мм –	0,2 мкм;
на рабочем поле с диаметром до 285 мм –	0,4 мкм.

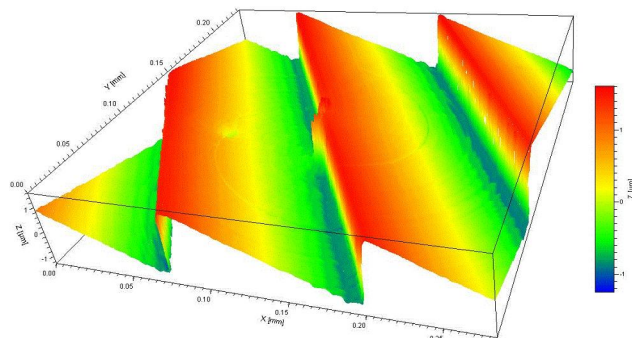
Дискретность позиционирования записывающего пучка, не более:
по радиусу – 1 нм;
по углу (при 600 об/мин) – 0,45 угл. сек.

Среднеквадратичная погрешность позиционирования, не более:
угловая – 1,5 угл. сек

Версия КЛЗС с двумя лазерами, показана рис. 3, а. На рис. 3, б приведена профилограмма трехмерной линейной решетки с блеском, записанной на этой установке на фоторезисте.



а



б

Рис. 3. а – КЛЗС с двумя лазерами; б – линейная решетка с периодом 100 мкм

Сканирующий профилометр (СП)

Сканирующий профилометр на основе хроматических конфокальных датчиков СП входящий в состав «Технологического комплекса» предназначен для получения информации о трехмерной структуре изготавливаемых изделий, а именно металлических и диэлектрических изделий изготовленных с помощью ФПЛ и КЛЗС. СП содержит две измерительные головки для рабо-

ты в диапазоне измерения с разрешением 10 или 1 мкм по оси Z соответственно в диапазонах 3 мм и 15 мм. Программное обеспечение СП позволяет на основе полученной информации синтезировать трехмерную структуру поверхности образца и записать полученные данные на управляющий компьютер, что обеспечивает контроль качества формирования микроканалов, сеток, дифракционных элементов на поверхности стекла с использованием исходной CAD-модели и технологических требований обработки. Внешний вид СП представлен на рис. 4.

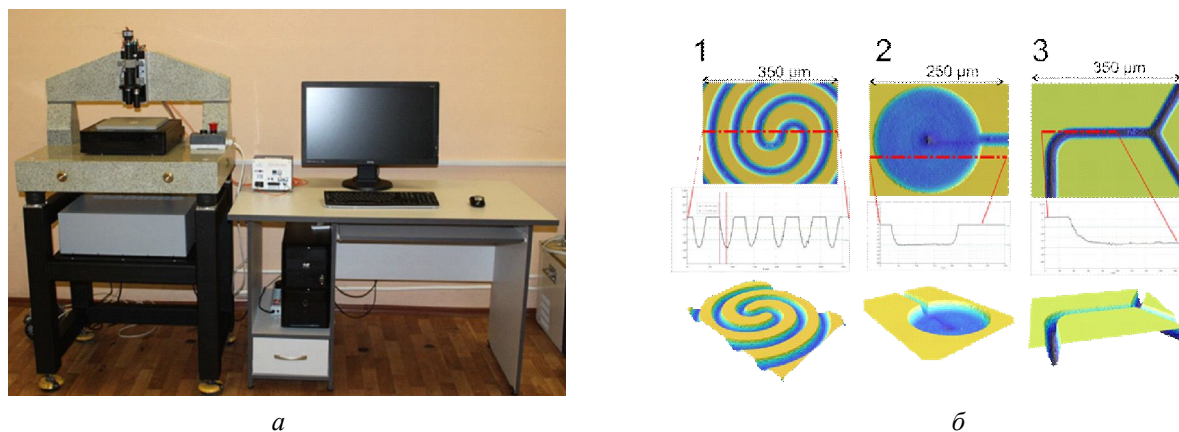


Рис. 4. Сканирующий профилометр:
а – внешний вид СП; б – профиль микрообработки стекла ФПЛ (1), (3), ширина линий 30 мкм, глубина 39 мкм. Шероховатость дна (Ra) 0,4 мкм, (2) глубина 26,8 мкм.

Заклучение

В настоящее время проведены предварительные испытания лазерного комплекса для прецизионного формирования с субмикронным разрешением топологии оптических шкал, сеток и лимбов, синтезированных голограмм, методами прямой лазерной записи, а также записи по фоторезисту с последующей физико-химической обработкой, как на поверхности, так и внутри изделий из стекла и оптических кристаллов, формирования тонких металлических масок сложной формы. Опытные партии изделий созданных по новым технологиям приняты нормоконтролем и установлены в опытные образцы оптико-электронных изделий. Показано, что комплекс позволяет гибко решать задачи микрообработки, как единичных изделий, так и серийной продукции, существенно ускорить создание опытных образцов изделий, повысить качество и надежность. Размеры наносимой топологии до 200x200мм в прямоугольных координатах или до диаметра 280 мм в полярных, с минимальным размером элемента топологии не более 3 мкм – технология фемтосекундной микрообработки и 0.6 мкм технология записи по фоторезистам, с дискретность позиционирования по радиусу 1 нм.

PRECISION LASER TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR MANUFACTURE SCALE GRIDS, PHOTOMASKS AND HOLOGRAMS, BASED OF LASER THREE-DIMENSIONAL MICRO- AND NANOMACHINING

*Bessmeltsev V.P.¹, Poleschuk A.G.¹, Korolkov V.P.¹, Nikonorov Y.N.², Karvan A.L.²,
Verhoglyad A.G.³*

(¹Institute of Automation and Electrometry; ²Schwabe – Defense and Protection;

³Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Novosibirsk, Russia)

The Laser Technological Complex is designed for high-precision three-dimensional micro-processing optical and semiconductor element in manufacturing process for mass production of optical and opto-electronic observation devices aiming and angular measuring devices with digital readout, including the application of grids and scales on glass products, based on laser technology forming with powerful femto, pico-second and continuous lasers.

The Complex includes «Laser technology workstation, based on tunable laser pulse duration (femto-pico) – for micromachining blanks of optical glass and crystals, as well as pieces of optical glass with a metal-plated metal foils, with snap for quick change blanks serial products»; «Circular precision laser recording system for manufacturing microstructures for various purposes, as described in polar or Cartesian coordinate system»; «Profiler based on scanning confocal chromatic sensors for quality control of manufactured microstructures».

System allows the flexibility to solve problems micromachining as individual products and serial products significantly accelerate the creation of prototypes of products, improve quality and reliability. Dimensions applied to 200*200 mm topology in Cartesian coordinates to a diameter of 280 mm or polar, with a minimum size element topology no more than 3 microns – the technology of femtosecond micromachining and 0.6 micron technology for recording photoresist with discrete positioning radius of 1 nm.

ОСЕВЫЕ СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММЫ – ОСНОВА ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛАЗЕРНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Лукин А.В., Балоев В.А., Ларионов Н.П., Мельников А.Н.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

В настоящее время лазерно-голографические методы и средства контроля для оптической технологии, базирующиеся на применении осевых синтезированных голограмм, обладают наибольшей универсальностью, обеспечивая высокую оперативность и точность измерений. В докладе рассмотрены основные области их применения:

- контроль всех видов асферических оптических поверхностей с осевой симметрией, в том числе методом «голографического пробного стекла»;
- контроль анаморфотных оптических элементов (с цилиндрическими и тороидальными рабочими поверхностями);
- контроль крупногабаритных выпуклых асферических оптических поверхностей с использованием обращения волнового фронта;
- радиальная сдвиговая интерферометрия;
- физическое моделирование сферических aberrаций 3-го и более высоких порядков (в отдельности и в любых заданных комбинациях);
- контроль центрировки линз;
- измерение радиусов кривизны сферических и цилиндрических поверхностей, в том числе аттестационный контроль пробных стекол 1-го класса;
- контроль процессов сборки и юстировки многокомпонентных линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем, в том числе крупногабаритных телескопических оптических систем наземного и космического базирования.

Работы по этому научно-технологическому направлению ведутся в Государственном институте прикладной оптики с середины 1960-х годов [1]. Были опробованы два метода изготовления осевых синтезированных голограмм – с помощью сфокусированного светового пучка и методом «специального алмазного резца» [2]. Практика показала, что метод «резца» в технологии изготовления осевых синтезированных голограмм предпочтителен.

Голограмма рассчитывается как картина интерференции, которая образовалась бы в результате суперпозиции заданных аналитически объектного и опорного волновых фронтов на основе представления о дифрагированном луче и обобщении теорем Малюса и Леви-Чивита на случай дифракции [3].

Осевые синтезированные голограммы изготавливаются на специальных круговых делительных машинах типа МДА-9, МДА-10 и МДГ-500. Дифракционная структура голограммы отображается в тонком металлическом слое, нанесенном на рабочую поверхность подложки, с помощью специального алмазного резца. Высокая точность её нанесения обеспечивается за счет использования «несущей» пространственной частоты, когда каждая расчетная прозрачная (неотражающая) зона голограммы отображается группой «элементарных» прозрачных зон с постоянным шагом [4].

В последние годы наблюдается непрерывно возрастающий интерес к созданию крупногабаритных телескопических оптических систем наземного и космического базирования [5]. При этом одна из трудно решаемых проблем – отсутствие надежных и достаточно точных методов и средств для технологического и аттестационного контроля выпуклых

асферических оптических поверхностей. Возможный метод решения – совместное применение синтезированной и физической голограмм, реализующее обращение волнового фронта [6].

Важнейшая проблема современного оптического телескопостроения – повышение точности, оперативности и надежности контроля юстировки наземных и космических зеркальных телескопов. Особенно остро эта проблема начинает выявляться в ходе работ по созданию уникальной отечественной космической обсерватории «Миллиметрон» (проект «Спектр-М») [5].

Предложено решение этой проблемы на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм, наносимых непосредственно на рабочую поверхность вторичного зеркала, преимущественно, в его краевой зоне. При этом обеспечивается возможность высокоточного совмещения оптических осей вторичного зеркала и системы голограмм и их гарантированная нерастраиваемость в дальнейшем [7, 8].

Основные задачи совершенствования техники и технологии синтеза осевых синтезированных голограмм:

- увеличение максимального светового диаметра изготавливаемых голограмм (не менее 1000 мм при наибольшей стрелке прогиба рабочей поверхности подложки 300 мм);
- увеличение максимальной пространственной частоты до 3000 мм⁻¹;
- повышение точности позиционирования режущей кромки алмазного резца до 10 нм;
- расширение номенклатуры материалов подложки и рабочих слоев голограмм;
- расширение рабочего спектрального диапазона в сторону дальней инфракрасной области;
- оптимизация выбора параметров контрольных схем;
- подготовка квалифицированных специалистов (технологов и операторов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйнов Г.Н., Лукин А.В., Мирумянц С.О., Мустафин К.С. Голографический способ контроля оптических поверхностей // Авт. св-во СССР на изобретение № 277269. – 1970.
2. Буйнов Г.Н., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Голографический интерференционный контроль асферических поверхностей // Оптико-механическая промышленность. – 1971. – № 4. – С. 6-11.
3. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 1. – С. 80-87.
4. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Искусственная голограмма как оптический компенсатор // Оптика и спектроскопия. – 1972. – Т. 32. – В. 2. – С. 396-399.
5. Бронштейн Ю.Л. Крупногабаритные зеркальные системы (контроль геометрии, юстировка). – М.: ДПК Пресс, 2015. – 600 с.
6. Городецкий А.А., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографический контроль выпуклых поверхностей на основе обращения волнового фронта // Оптико-механическая промышленность. – 1983. – № 12. – С. 53-54.
7. Балоев В.А., Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н. и др. Устройство юстировки двухзеркальной центрированной оптической системы // Патент РФ на изобретение № 2467286. – 2012.
8. Белозёров А.Ф., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения // Фотоника. – 2014. – Ч. I. – № 4. – С. 12-32; – Ч. II. – № 5. – С. 30-41.

**ON-AXIS COMPUTER-GENERATED HOLOGRAMS AS A BASIS
OF PRECISION LASER AND HOLOGRAPHIC METHODS
AND FACILITIES FOR MONITORING IN OPTICAL TECHNOLOGY**

Lukin A.V., Baloev V.A., Larionov N.P., Melnikov A.N.

(OJSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan)

The paper presents some principles used for calculating and manufacturing on-axis computer-generated holograms, employed as sample optical elements and optical compensators (zero adjusters). A hologram structure is calculated as an interference pattern to be obtained as a result of the superposition of the analytically given object and reference wavefronts. The hologram calculation is based on the conception of a diffracted beam and the generalized theorems of Malus and Levi-Civita for the diffraction case. The calculated hologram rings are made by using a special diamond tool in a thin metallic layer, deposited on the operative substrate surface. Holograms are fabricated with the help of unique circle ruling engines. High accuracy of forming the calculated holographic structure is provided by the use of a spatial frequency “carrier”. Such being the case, each calculated transparent (non-reflective) hologram zone is represented by a cluster of “elementary” transparent zones at a constant pitch.

The paper deals with the main applications of on-axis computer-generated holograms in optical technology: monitoring of various types of aspherical optics, certification of spherical test glasses, control of lens centering, control of the assembly and alignment processes of multi-component lens, mirror and catadioptric systems, including large-sized telescopic optical systems at ground- and space-based observatories. Some tasks of updating circular ruling engines have been set.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Толстик А.Л.

(Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь)

Работы по динамической голографии ведутся с начала 70-х годов. Первые шаги в этой области были сделаны за счет переноса идей и методов традиционной (статической) голографии на процессы динамической записи и обработки световых полей в нелинейных средах. Запись динамических голограмм в растворах красителей привела к открытию нового физического явления – обращения волнового фронта (фазового сопряжения) световых волн при четырехволновом взаимодействии. На основе обращения волнового фронта были разработаны оригинальные способы компенсации фазовых искажений при распространении излучения в оптически неоднородных средах и предложены новые методы оптической обработки информации в реальном времени. В течение первых десятилетий были развиты физические основы динамической голографии, установлена ее тесная связь с нелинейной оптикой и разработаны новые методы использования динамических голограмм для решения разнообразных задач преобразования пространственной структуры световых полей, передачи изображений через неоднородные среды, транспортировки излучения в среде с амплитудными препятствиями, оптической обработки и записи информации, изменения контраста, оконтуривания и инвертирования изображений, реализации ассоциативной голографической памяти, разработки лазеров на динамических решетках, использования динамических решеток для измерения разнообразных параметров нелинейных сред и др.

Существенное расширение возможностей дифракционных методов преобразования световых полей и методов нелинейной спектроскопии связано с переходом в 90-х годах к нелинейной записи динамических голограмм, реализуемой в средах при проявлении нелинейностей пятого и более высоких порядков. В таких условиях имеют место искажения профиля штриха голографической решетки, которые традиционно рассматривались как негативный фактор, приводящий к появлению шумовых компонент дифрагированного излучения. Однако при нелинейной голографической записи появляются новые компоненты в Фурье-разложении нелинейной восприимчивости среды по пространственным гармоникам динамической решетки, что позволяет реализовать дифракцию считывающего луча в брэгговском режиме во второй и более высокие порядки за счет изменения направления распространения или частоты считывающей волны.

Анализ свойств нелинейных голографических элементов, позволяющих осуществлять мультиплицирование фазы, способствовал существенному развитию методов обработки оптической информации (пространственная фильтрация, ассоциативная память) и позволил осуществить различные виды преобразований светового пучка (преобразование формы волнового фронта, корректировка искажений пространственной структуры, изменение направления распространения и места фокусировки светового пучка, частотное преобразование объемных изображений, обращение волнового фронта с одновременным преобразованием частоты излучения и др.).

В настоящей работе изложены основные теоретические и экспериментальные результаты по преобразованию световых полей динамическими голограммами в условиях проявления нелинейностей высших порядков. Рассмотрены основные физические процессы, приводящие к формированию нелинейного отклика, и способы повышения эффективности дифракции в различные порядки. Особое внимание уделено новому направлению динамической голографии, связанному с записью сингулярных голограмм, формируемых при интерференции гауссовых и сингулярных световых полей (оптических вихрей). Интерес к таким голограммам обусловлен

возможностью управления сложным волновым фронтом световых пучков, включая их топологическую структуру.

Топологическая структура сингулярных световых пучков обусловлена наличием на волновом фронте особых точек – винтовых дислокаций, в которых интенсивность обращается в ноль, а фаза не определена. При обходе вокруг винтовой дислокации по сечению пучка фаза изменяется на величину $2\pi l$, где l – величина, называемая топологическим зарядом. В зависимости от знака l винтовые дислокации разделяются на положительные (правые) и отрицательные (левые). Сингулярные световые пучки обладают свойством сохранять свой топологический заряд при распространении, при этом дифракционная расходимость изменяет только поперечный размер пучка, сохраняя нулевую интенсивность в центре винтовой дислокации. Указанные свойства позволили использовать сингулярные пучки для захвата и манипуляции микрообъектами, оптической передачи информации, создания волноводных структур, анализа фазово неоднородных сред с высокой степенью хаотизации, включая турбулентные явления в атмосфере.

Нелинейно сформированные динамические голограммы, как правило, имеют невысокую дифракционную эффективность. Для увеличения дифракционной эффективности предложено использовать новый механизм проявления нелинейностей высших порядков, обусловленный нелинейностью термооптического коэффициента поглощающих жидкостей и зависимостью от температуры плотности и теплоемкости растворителя. В этих условиях удалось на два порядка повысить дифракционную эффективность квадратичных динамических голограмм в сравнении с известными мировыми аналогами и выйти на уровень дифракции в несколько десятков процентов.

Для управления параметрами динамических дифракционных структур предложено использовать дополнительный световой пучок, который непосредственно не взаимодействует с волнами, записывающими голограмму, но влияет на формирование дифракционных решеток. Проанализирована схема записи динамических голограмм на частоте, отвечающей основной полосе поглощения при использовании дополнительной оптической подкачки в полосе поглощения с возбужденного синглетного или триплетного уровня. Установлено, что пространственная модуляция населенности возбужденного уровня (в соответствии с интерференцией сигнальной и опорной волн) приводит к неоднородному тепловыделению при поглощении пространственно однородного управляющего пучка и, как следствие, записи в объеме среды дополнительных термоиндуцированных интерференционных структур.

Для формирования сингулярных световых пучков использованы специально изготовленные голографические транспаранты на основе слоев полиметилметакрилата с фенантренином в качестве регистрирующего материала для записи фазовых транспарантов, преобразующих гауссовы световые пучки и импульсы в сингулярные. Выбор материала обусловлен возможностью получения фазовых объемных голограмм с дифракционной эффективностью близкой к 100 %, а также прозрачностью экспонированного материала в видимой и ближней ИК-области спектра.

Использование схем нелинейной голографической записи позволило реализовать инвертирование и мультиплицирование топологического заряда, а также частотное преобразование оптических вихрей из ИК-области спектра в видимую. Дополнительные возможности появляются в схеме записи динамических голограмм, когда в качестве как сигнальной, так опорной и считывающей волн используются сингулярные световые пучки. В этом случае величина топологического заряда дифрагированного пучка определяется выражением: $l_D = M l_1 + l_2 - M l_s$, где M – порядок дифракции. Из приведенного выражения видно, что при реализации нелинейного взаимодействия сингулярных световых пучков появляется возможность осуществления алгебраических операций (сложение, вычитание, умножение на целое число) при использовании топологического заряда в качестве информационного параметра.

Дополнительные возможности открывает поляризационная запись сингулярных голограмм. При поляризационно-голографической записи опорная и сигнальная волны поляризованы таким образом, что суммарная интенсивность этих волн остается постоянной и имеет место только пространственная модуляция состояния поляризации света в соответствии с разностью фаз записываемых голограмму волн. Однако и в этих условиях в резонансных средах возможно формирование динамических решеток вследствие зависимости интенсивности насыщения поглощения от поляризации лазерного излучения. На основе поляризационных динамических голограмм реализовано управление поляризацией сингулярных световых пучков, включая поворот плоскости поляризации, а также трансформацию линейной поляризации излучения в круговую или эллиптическую.

Таким образом, приведенные в настоящей работе результаты иллюстрируют широкие возможности использования динамических голограмм в разнообразных системах управления пространственной структурой лазерных пучков. Световые пучки, дифрагированные на различных пространственных компонентах динамической решетки, отличаются как направлением распространения, так и пространственной структурой волнового фронта. Увеличение порядка дифракции приводит к усилению фазовых искажений. Сглаживание пространственной структуры волнового фронта имеет место при увеличении частоты считываемой волны. При этом возможна реализация обращения волнового фронта с одновременным преобразованием частоты излучения, что перспективно для визуализации сложных ИК-изображений. Запись динамических голограмм сингулярными световыми пучками позволяет реализовать мультиплицирование топологического заряда, используя различные порядки дифракции. Введение новых информационных параметров (поляризации излучения и топологического заряда) позволяет объединить возможности поляризационной голографии и сингулярной оптики и на новых принципах осуществлять кодирование информации. Использование таких характеристик дифрагированного излучения в качестве нетривиальных информационных параметров позволяет осуществлять формирование скрытых изображений, которые одновременно могут совместить технологию голографической защиты с записью кодированной информации.

DYNAMIC HOLOGRAPHY AND ITS APPLICATIONS

Tolstik A.L.

(Belarusian State University)

Investigations in the field of dynamic holography conducted since the beginning of the 70-ies of the last century enable realization of numerous laser- radiation wavefront transformation methods including phase conjugation, phase multiplexing, frequency conversion of 3-D images, contrast variation, contouring, image inversion, etc. Apart from the conventional recording of dynamic holograms, nonlinear recording of dynamic holograms formed in the media with fifth- and higher-order nonlinearities becomes more and more popular. Diffraction from such holograms makes it possible to realize in the Bragg mode multiplexing of the phase for a signal wave. Using radiation at the frequency that is a multiple of the frequency of hologram recording waves, one can realize the wavefront conjugation with simultaneous conversion of the radiation frequency.

A new trend in dynamic holography is associated with recording of singular holograms formed on interference of Gaussian and singular light fields (optical vortexes). These holograms are of particular interest because of the possibility to control the wave front of light beams, their topological structure including. The use of the patterns of nonlinear holographic recording makes it possible to realize inversion and multiplexing of topological charges, and also the frequency conversion of optical vortexes from IR region to the visible. Using the topological charge of a singular beam as an information

parameter, on the basis of singular dynamic holograms one can perform several algebraic operations: charge inversion, integer multiplication, summation and subtraction. Besides, polarization recording of singular holograms opens up new possibilities. These holograms are used to control dynamically the polarization of singular beams: polarization plane rotation and transformation of a linear polarization to the circular or elliptical one. Owing to the introduction of such nontrivial information parameters as radiation polarization or topological charge, we can combine the potentialities of polarization holography and singular optics to realize information coding on new principles.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ И ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ НА НИХ

Кутанов А.А., Сыдык Н., Снимщиков И.А., Великасов С., Макаров В.П.

(Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Киргизия)

Получены спектральные интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния методом магнетронного напыления на отражающий металлический слой, предварительно нанесенный на стеклянную подложку. Интерференционные фильтры на пленках а-Si, позволяют выделять из исходно белого света соответствующие квазимонохроматические компоненты длин волн с узкой областью пропускания. Толщина пленки аморфного кремния определяет центральную длину волны полосы пропускания такого фильтра. Разработанное магнетронное устройство, позволяет наносить однородные пленочные покрытия толщиной от 10 нм до нескольких микрон. Проведены оптические, морфологические и структурные исследования, которые указывают на перспективность получения пленок аморфного кремния на разработанной магнетронной системе. Интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния отражают часть спектра падающего излучения, благодаря явлению многолучевой интерференции в тонких диэлектрических плёнках.

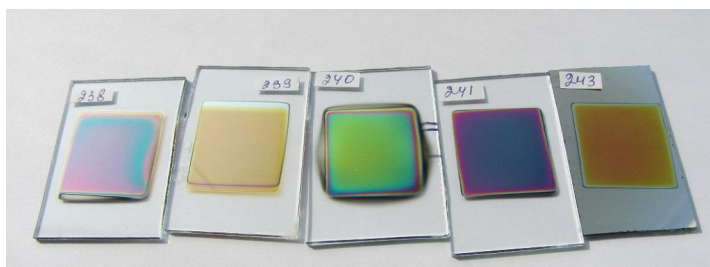


Рис. 1. Фотография спектральных интерференционных фильтров на пленках аморфного кремния с различными полосами отражения света

Интерференционные фильтры на аморфном кремнии могут найти применение в спектроскопии, но и для прямой лазерной записи. Метод прямой лазерной записи на слое аморфного кремния основан на явлении прямого формирования микрорельефа под действием лазерного облучения.

Прямая запись на слое аморфного кремния одномодовым Blu Ray лазерным диодом с $\lambda = 405$ нм. Ранее, мы показали возможность прямой лазерной записи точечных голограмм на пленке аморфного кремния импульсным УФ лазера с $\lambda = 355$ нм [1]. В данной статье приведены результаты исследований по прямой лазерной записи на слое аморфного кремния одномодовым лазерным диодом с $\lambda = 405$ нм.

Прямая лазерная запись на пленки аморфного кремния может быть использована для получения мастер-голограмм, изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Также, разработанное устройство [2] и технология прямой лазерной записи микрорешеток, могут быть использованы для нанесения антиотражающих субволновых покрытий для солнечных батарей.

Исследованы спектры поглощения слоя а-Si для образцов с различной толщиной (рис. 2). Для измерения спектров поглощения в тонких пленках а-Si использован двухлучевой спектрофотометр PVE UNICAM 100. На основе проведенного исследования показано, что для записи на слоях а-Si наиболее предпочтительно использовать лазеры с длиной волны 355 нм и 405 нм.



Рис. 2. Спектры поглощения пленок аморфного кремния в зависимости от длины волны излучения и для различных толщин слоя

Для прямой записи на аморфном кремнии использовался Mitsubishi 120mW одномодовый Blu Ray лазерный диод. Лазерный луч коллимировался с помощью асферической линзы после лазерного диода, а затем он фокусировался микрообъективом на носитель записи. Длительность лазерных импульсов и их частота контролировалась от компьютера. На рис. 3 приведены фотографии линий записи одномодовым Blu-Ray лазерным диодом на пленке a-Si на стеклянной подложке, снятые на микроскопе в проходящем свете. Измерение записанного рельефа показывает, что при взаимодействии лазерного излучения на пленку аморфного кремния формируется рельеф высотой 30 – 100 нм.

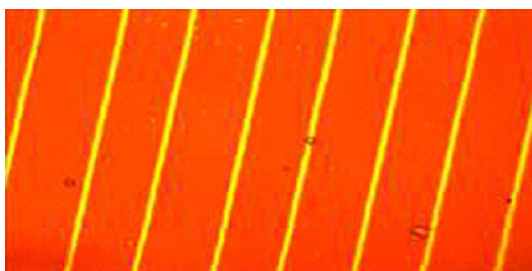


Fig.3. Фотографии линий записанных на слое аморфного кремния одномодовым лазерным диодом с $\lambda = 405$ нм

Продемонстрирована возможность прямой лазерной записи одномодовым полупроводниковым лазером с $\lambda = 405$ нм на интерференционном фильтре на пленке a-Si (рис. 4).



Рис. 4. Фотография прямой лазерной записи на спектральном интерференционном фильтре на пленке аморфного кремния излучением полупроводникового Blu Ray лазера с длиной волны 405 нм.

Недостатком одномодового лазерного диода, используемого в экспериментах была малая длина когерентности и ее зависимость от мощности излучения. В связи с этим, было трудно записать Blu Ray лазером точечные голограммы. Таким образом, будет полезно использовать Blu Ray лазерный диод с большей длиной когерентности.

Заключение

Показано, что при взаимодействии сфокусированного лазерного луча на слой a-Si происходит локальная кристаллизация и формирование рельефа глубиной ~ 30-100 нм. Измерения спектра поглощения показали, что показатель преломления аморфного кремния слоя меняется после воздействия сфокусированного лазерного луча. Это делает привлекательным использование прямой лазерной записи на аморфном кремнии для приложений обеспечивающих защиту от копирования. Продемонстрирована прямая лазерная запись на интерференционном фильтре на аморфном кремнии одномодовым Blu Ray лазерным диодом $\lambda = 405$ нм. Использование одномодовых Blu Ray лазерных диодов открывает возможности для разработки компактного лазерного устройства для записи дифракционных структур на аморфном кремнии для различных приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kutanov A.A. and Snimshikov I.A.* Direct laser recording of dot holograms on a-Si film// Proceeding Optics Photonics Japan 2011. – P. 30aCS2.
2. Пат. № 007874 Евразия. Устройство для записи дифракционных элементов // А. Г. Полющук, А. А. Кутанов, В. П. Бессмельцев, И. А. Снимщиков. Опубл. 2007, Бюл. № 1.

THE SPECTRAL INTERFERENCE FILTERS ON AMORPHOUS SILICON FILMS AND DIRECT LASER WRITING ON THEM

Kutanov A.A., Sydyk N., Snimshikov I.A., Velikasov S., Makarov V.P.

*(Institute of Physical and Technical Problems of Materials Science
and the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan)*

The spectral interference filters on the amorphous silicon films deposited by magnetron sputtering on the reflective metal layer on a glass substrate are presented. Interference filters select from white light source components corresponding to quasi-monochromatic wavelength with a narrow bandwidth. The film thickness of the amorphous silicon determines the center wavelength of the pass band of the filter. Designed magnetron device provides uniform film coating with thickness from 10 nm to several microns. Direct laser recording on amorphous silicon layer of the interference filter by single-mode Blu Ray laser with $\lambda = 405$ nm is demonstrated. Use of single-mode laser diodes Blu Ray opens up opportunities for the development of compact laser device for recording the diffraction optical elements for different applications.

СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Корешев С.Н., Корепин И.Н.

*(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург)*

Аннотация

Рассмотрена проблема синтеза голограмм-проекторов сфокусированного изображения, работающих совместно с объективом невысокого качества. Сформулированы и научно обоснованы рекомендации по выбору параметров синтеза и отображения голограмм, определяющих качество восстанавливаемых с их помощью изображений. Установлено, что совместное использование голограммы и проекционной системы позволяет достичь предельного для оптики минимального характеристического размера элемента фотошаблона, равного длине волны восстанавливающего излучения. Разработан метод синтеза голограмм сфокусированного изображения, основанный на составлении таблиц соответствия. На его основе создан программный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов сфокусированного изображения. Показаны возможность и перспективность использования комплекса в решении фотолитографических задач.

Ключевые слова: голография, фотолитография, синтезированная голограмма сфокусированного изображения, проекционная оптическая система.

Введение

Необходимость снижения стоимости современных электронных устройств, и повышения степени их интеграции вынуждают производителей искать пути усовершенствования и оптимизации существующих вариантов проекционной фотолитографии. Один из них основан на использовании синтезированных голограмм, предназначенных для формирования на поверхности фоторезиста изображения структуры изготавливаемого электронного прибора (см., например, [1, 2]). Так, в литературе рассмотрен вариант фотолитографического процесса, на основе синтезированных рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов Френеля [3]. В нем функцию проекционного объектива выполняет дискретная бинарная голограмма Френеля. Основные особенности рассмотренного метода состоят, во-первых, в отсутствии необходимости использования оптических сред прозрачных в рабочей области спектра. Во-вторых, в возможности построения безаберрационного изображения в пределах больших полей, что ограничивает размер одновременно экспонируемого участка фоторезиста лишь мощностью источника. В-третьих, в том, что использование синтезированных голограмм-проекторов устраняет необходимость изготовления реального фотошаблона, заменяя его самой синтезированной голограммой-проектором. Все это делает этот вариант процесса весьма перспективным для использования в экстремально коротковолновой УФ области спектра. Не менее перспективным, по нашему мнению, является использование, в фотолитографии, проекционной системы из синтезированной голограммы сфокусированного изображения, работающей совместно с объективом невысокого качества (далее СГСИ). Такая система позволяет частично освободить голограмму-проектор от функций силового элемента и за счет этого несколько упростить ее структуру, а, следовательно, и стоимость. Вместе с тем информация о возможных методах синтеза СГСИ в доступной нам литературе отсутствует. Такое состояние дел обусловило необходимость постановки настоящей работы, направленной на разработку метода и средств синте-

за СГСИ, работающих совместно с проекционными объективами и пригодных для использования в проекционном фотолитографическом процессе.

При её выполнении полагалось, что алгоритм синтеза голограммы-проектора должен находиться в соответствии с реальным физическим процессом регистрации и восстановления голограмм и, как следствие, должен включать в себя следующие основные этапы: 1. Расчет комплексной амплитуды излучения, дифрагировавшего на объектном транспаранте, в плоскости входного зрачка объектива. Этот этап подобен описанному в работе [4] расчету поля объектной волны в плоскости синтеза голограммы-проектора Френеля, проводимого на основе принципа Гюйгенса-Френеля. Он заключается в расчете распределения комплексной амплитуды формируемого поля объектной волны, в плоскости входного зрачка оптической системы. 2. Учет преобразования волнового фронта, осуществляемого проекционным объективом. 3. Последний этап – расчет распределения поля от выходного зрачка оптической системы до плоскости голограммы. Он аналогичен первому этапу и может быть решен теми же способами.

Влияние проекционного объектива на выбор периодов дискретизации фотошаблона, входного и выходного зрачков оптической системы и голограммы

Необходимость учета оптической системы в алгоритме синтеза-восстановления обуславливает специфические требования, предъявляемые к выбору параметров синтеза и восстановления СГСИ, работающих с объективом невысокого качества, отличные от требований, приведенных в работе [3] для голограмм-проекторов Френеля. Рассмотрим наиболее простой случай СГСИ, регистрируемой с наклонным параллельным опорным пучком. В качестве транспаранта будем рассматривать одномерную бинарную амплитудную структуру, освещаемую параллельным нормально-падающим пучком когерентного излучения. Кроме того, будем считать, что центры параллельно расположенных голограммы и транспаранта лежат на оптической оси проекционного объектива. Тогда числовая апертура пучка, продифрагировавшего на самом маленьком элементе структуры транспаранта, будет описываться выражением

$$A = n \sin \alpha = \lambda / a_t, \quad (1)$$

где A – числовая апертура пучка; n – показатель преломления среды между объектом и проекционным объективом, который в нашем случае равен единице; α – апертурный угол дифрагировавшего излучения; λ – рабочая длина волны; a_t – характеристический размер объекта, т.е. минимальный размер элемента структуры фотошаблона. Угол α в выражении (1) можно считать максимальным апертурным углом оптической системы. Тогда максимальная числовая апертура пучка в пространстве изображений оптической системы может быть описана выражением

$$A' = n' \sin \alpha' = A / \beta, \quad (2)$$

где A' – числовая апертура пучка в пространстве изображений оптической системы; n' – показатель преломления среды между объективом и голограммой (в нашем случае также $n' = 1$); α' – задний апертурный угол; β – линейное увеличение оптической системы. Из требования разделения порядков дифракции голограммы следует, что угол падения опорного пучка θ должен удовлетворять неравенству

$$\theta \leq \alpha'. \quad (3)$$

Тогда минимальная величина пространственного периода голограммы T_{\min} будет определяться выражением

$$T_{\min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha'} \leq \frac{\lambda \beta}{2 \sin \alpha}. \quad (3)$$

Из выражений (1) – (4) следует, что период дискретизации голограммы зависит от характеристического размера элемента структуры объекта, а также от увеличения оптической системы. С учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) эта зависимость будет описываться выражением

$$d \leq \frac{1}{2} T_{\min} \leq \frac{a_i \beta}{4}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что минимальный характеристический размер голограммы, а, значит, и диаметр рабочего фокального пятна генератора изображений, используемого для отображения голограммы на подложке, могут варьироваться путем выбора необходимого увеличения проекционной оптической системы. Эта особенность позволяет снизить требования, предъявляемые к разрешающей способности генератора изображений, что делает выбор такой голографической системы более привлекательным по сравнению со схемой на основе синтезированных голограмм-проекторов Френеля. Для них предельный характеристический размер структуры голограммы должен быть, как минимум, в четыре раза меньше характеристического размера фотошаблона [4]. С целью определения параметров синтеза голограмм-проекторов, обеспечивающих разделение порядков дифракции голограммы, рассмотрим случай одномерных амплитудных голограмм, регистрируемых с параллельным наклонно падающим опорным пучком. При этом будем исходить из того, что в случае записи аналоговой голограммы функция ее амплитудного пропускания имеет вид

$$t(x) = t_0 - kI(x), \quad (6)$$

где $I(x)$ – функция распределения интенсивности голографического поля в плоскости голограммы; t_0 – начальный уровень пропускания; k – коэффициент пропорциональности. В случае дискретных голограмм-проекторов функция распределения интенсивности голографического поля $I_d(x)$ будет иметь вид [4]

$$I_d(x) = \left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect} \left(\frac{x}{a} \right), \quad (7)$$

где d – период дискретизации голограммы; a – диаметр рабочего фокального пятна генератора изображений; N – число элементов на голограмме. Подставляя (7) в (6), получим выражение, описывающее функцию комплексной амплитуды излучения, восстановленного дискретной синтезированной голограммой-проектором непосредственно за плоскостью голограммы

$$\begin{aligned} W_d(x) &= t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - k r \exp(2\pi i \xi_r x) \left[\left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect} \left(\frac{x}{a} \right) \right] = \\ &= t_0 r \exp(2\pi i \xi_r x) - k r \exp(2\pi i \xi_r x) \left[\left\{ A(x) A^*(x) + r^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + A(x) r \exp(-2\pi i \xi_r x) + A^*(x) r \exp(2\pi i \xi_r x) \right\} \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right] \otimes \text{rect} \left(\frac{x}{a} \right), \quad (8) \end{aligned}$$

где $A(x)$ – комплексная амплитуда объектной волны; $A^*(x)$ – амплитуда волны, комплексно-сопряженной объектной волне; r – действительная часть комплексной амплитуды плоской опорной волны; $\xi_r = \frac{\sin(\theta)}{\lambda}$ – пространственная частота опорной волны; λ – рабочая длина волны.

Для проведения анализа структуры восстановленного голографического поля в частотном пространстве запишем функцию $U_d(\xi)$, описывающую спектр восстановленного поля, в виде:

$$U_d(\xi) = t_0 F \{ r \exp(2\pi i \xi_r x) \} - k F \{ r \exp(2\pi i \xi_r x) \} \otimes \left\{ \left[F \{ A(x) A^*(x) \} + F \{ r^2 \} + F \{ A(x) r \exp(-2\pi i \xi_r x) \} + F \{ A^*(x) r \exp(2\pi i \xi_r x) \} \right] \otimes \sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n) \right\} a \frac{\sin(\pi \xi a)}{\pi \xi a}. \quad (9)$$

Здесь сделано допущение, что число дискретных элементов на голограмме N настолько велико, что сумму $\sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n)$ можно принять равной сумме $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n \cdot d)$. Фурье-образ такой функции равен $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \xi_n)$ [5].

Выражение (9) состоит из двух слагаемых. Первое из них, обусловленное средним пропусканием голограммы, аналогично первому слагаемому соответствующего выражения для спектра непрерывной голограммы. Второе слагаемое описывает свертку трех основных порядков дифракции непрерывной голограммы с суммой дельта-функций. Эта свертка соответствует периодическому повторению спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы, обусловленному дискретным характером синтезированной голограммы-проектора. При этом период мультипликации спектра ξ_n обратно пропорционален периоду d дискретизации голограммы.

На рис. 1 схематически представлен график функции $U_d(\xi)$, выполненный для случая объекта, характеризующегося полосой пространственных частот $\pm\Delta/2$. Данный график отображает спектр амплитуды поля, восстанавливаемого с помощью дискретной голограммы-проектора. Изображенные на нем пики шириной 2Δ , соответствуют интермодуляционным помехам в нулевом порядке дифракции голограммы, более узкие пики, шириной Δ – спектрам изображений, восстанавливаемым в ± 1 порядках, а стрелки соответствуют дельта-функциям, описывающим периодическое повторение спектра восстанавливающей волны, обусловленное дискретным характером голограммы.

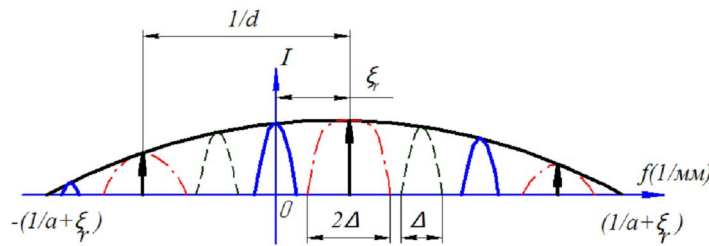


Рис. 1. Схематическое представление графика функции $U_d(\xi)$ для объекта с полосой пространственных частот равной $\pm\Delta/2$

Из рисунка следует, что выполнение равенства

$$a = d_d, \quad (10)$$

обеспечивает частичное подавление мультипликации спектра. Кроме того, необходимость обеспечения пространственного разделения компонентов восстановленного поля обуславливает требование ограничения ширины спектра объекта, т.е. выполнения неравенства

$$\Delta \leq \frac{1}{4d_d}, \quad (11)$$

а также ограничения минимальной пространственной частоты опорной волны равной

$$|\xi_r| = \frac{\sin|\theta|}{\lambda} = 1,5\Delta_{\max}, \quad (12)$$

где $\Delta_{\max} = \frac{1}{4d_d}$. Отсюда получим условие выбора угла падения опорной волны

$$\sin|\theta| = \frac{1,5\lambda}{a_t\beta}, \quad (13)$$

Из выражения (13) видно, что выбор линейного увеличения оптической системы $|\beta| \geq 1,5$ позволяет формировать изображения объектов с предельным для оптики характеристическим размером, равным рабочей длине волны λ . Однако, следует отметить, что дальнейшее увеличение параметра β не влияет на характеристический размер элемента восстанавливаемого изображения. Это ограничение следует из условия $\sin\alpha \leq 1$, т.е. из максимального значения апертуры излучения в выражении (13) при фиксированном показателе преломления среды $n = 1$.

Наличие в данной голографической системе проекционного объектива приводит к необходимости определения предельных значений размеров и периодов дискретизации его зрачков, обеспечивающих трансляцию информации о структуре объекта на плоскость голограммы. С этой целью рассмотрим оптическую систему, строящую увеличенное в β раз действительное изображение объекта с характеристическим размером a_t . Как и в случае с выбором предельного значения периода дискретизации голограммы-проектора, минимальные пространственные периоды функции, описывающей распределение комплексных амплитуд объектного пучка в плоскости входного или выходного зрачка, зависят от максимальных телесных углов α и α' , в пределах которых распространяется излучение протифрагированное на объекте или голограмме. Следовательно, они могут быть определены исходя из следующих неравенств:

$$T_{d\min} \leq \frac{\lambda}{2\sin\alpha}, \quad (14)$$

$$T'_{d\min} \leq \frac{\lambda}{2\sin\alpha'}. \quad (15)$$

Тогда с учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) минимальные пространственные периоды функции распределения комплексных амплитуд в плоскости входного и выходного зрачков будут выражаться следующими соотношениями:

$$d_d \leq \frac{1}{2}T_{d\min} \leq \frac{\lambda}{4\sin\alpha} \leq \frac{a_t}{4}, \quad (16)$$

$$d'_d \leq \frac{1}{2}T'_{d\min} \leq \frac{\lambda}{4\sin\alpha'} \leq \frac{a_t\beta}{4}, \quad (17)$$

Для передачи информации о комплексной амплитуде объектного пучка оптическая система должна обеспечить «захват» излучения, распространяющегося в направлении плоскости голограммы в пределах телесного угла α , зависящего от характеристического размера объекта. Кроме того, необходимость обеспечения непрерывности линий восстановленного изображения при синтезе голограммы требует соблюдения равенства периодов дискретизации фотошаблона и восстановленного изображения. Это обуславливает необходимость ограничения участка линейной апертуры оптической системы, несущего информацию о каждом элементе дискретизации объекта величинами D_d и D'_d соответственно для передней и задней апертур оптической

системы. Исходя из геометрических соображений (см. рис. 2), эти значения соответственно равны:

$$D_d = R \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{a_t} \right) \right], \quad (18)$$

$$D'_d = R' \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{a_t \beta} \right) \right], \quad (19)$$

где R – расстояние от плоскости объекта до входного зрачка оптической системы; R' – расстояние от выходного зрачка оптической системы до плоскости голограммы.

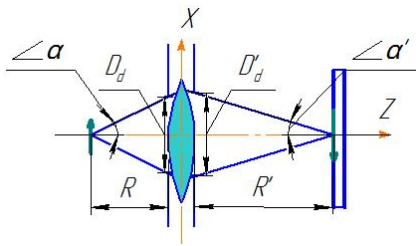


Рис. 2. Формирование оптической системы увеличенного изображения объекта в плоскости регистрации голограммы

Значения R и R' являются характеристиками выбранной оптической системы. Однако, необходимо учесть, что параметр R' должен выбираться исходя из условия обеспечения пространственного разделения восстанавливающего пучка лучей и формируемого изображения объекта. Зная значения D_d , D'_d , d_d и d'_d , можно определить количество точек плоскостей входного и выходного зрачков оптической системы, в которых необходимо вычислять значения комплексной амплитуды объектной волны при синтезе и цифровом восстановлении голограммы. Его можно рассчитать по следующим формулам для входного и выходного зрачков, соответственно:

$$M_d = 1 + D_d / d_d, \quad (20)$$

$$M'_d = 1 + D'_d / d'_d. \quad (21)$$

Такое количество отсчетов обеспечивает регистрацию на голограмме всей информации о структуре фотошаблона, однако, при больших апертурах, делает процесс синтеза голограммы чрезвычайно трудоемким. Так, например, для синтеза голограммы-проектора точечного объекта размером 1 мкм при длине волны 0,488 мкм и оптической системе, находящейся на расстоянии 50 мм от плоскости голограммы и формирующей увеличенное в четыре раза изображение объекта, необходимо, согласно (20), вычислить комплексную амплитуду поля объектной волны в плоскости входного зрачка, как минимум в 12300 точках.

Метод синтеза голограммы-проектора сфокусированного изображения на основе составления таблицы соответствия

Таким образом, основная трудоемкость процесса синтеза голограммы приходится на вычисление значений функции распределения комплексной амплитуды поля объектной волны в плоскости синтеза. Это обусловлено необходимостью подробной (с учетом теоремы отсчетов) трансляции информации о структуре объекта через оптическую систему в цифровой области. Для этого функция комплексной амплитуды поля объектной волны должна вычисляться в плоскости зрачка оптической системы с чрезвычайно малым шагом дискретизации, что приводит к невозможности использования традиционных методов расчета оптических систем. Это обусловило необходимость разработки специального метода, обеспечивающего выполнение требу-

емых условий и скорости работы. В его основу был положен «lookup table» метод, хорошо зарекомендовавший себя в тех областях науки и техники, где требуется выполнять многократные однотипные вычисления.

Сущность метода заключается в разбиении поля зрения оптической системы в предметном пространстве на типовые участки (точки) с заданной дискретизацией, для которых, путем расчета необходимого количества действительных лучей, вычисляется комплексная амплитуда объектного пучка в плоскости синтеза голограммы-проектора. При этом пучок лучей ограничивается конусом равным двум апертурным углам, а количество лучей, равномерно распределенных внутри конуса, вычисляется на основании выражений (20). Рассчитанное таким образом элементарное поле сохраняется в компьютере, образуя ячейку таблицы соответствия. На рис. 3 показана графическая визуализация такой ячейки, представляющей собой двумерный массив комплексных чисел, в котором хранятся данные о распределении комплексной амплитуды излучения сформированного одной точкой объекта.

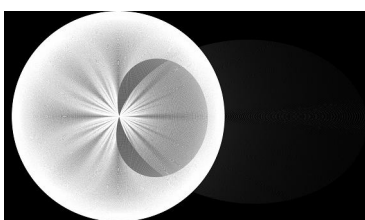


Рис. 3. Графическое представление элементарной ячейки таблицы соответствия для точки на краю поля тестового объектива

Несмотря на большую трудоемкость такого вычисления элементарных ячеек для всех точек рабочего поля зрения оптической системы, эта операция должна быть выполнена лишь один раз для каждого объектива, т.к. данный этап синтеза голограммы не зависит от структуры конкретного транспаранта и может считаться «предварительным» этапом вычисления комплексной амплитуды объектной волны. На следующем этапе, который условно можно назвать «основным», происходит сложение тех ячеек таблицы, которые соответствуют светлым точкам структуры объекта. При этом осевая симметрия оптических систем позволяет существенно сократить объем требуемых вычислений и свести его к расчету комплексных амплитуд, соответствующих излучению одного ряда точек объектной плоскости, расположенных вдоль одной из полуосей x или y системы координат предмета. Функции распределения амплитуд других точек могут быть вычислены путем поворота соответствующей ячейки-массива на угол ϕ .

Применение разработанного метода таблиц соответствия позволяет избежать большинства ограничений свойственных другим широко известным методам. Благодаря разделению процесса вычисления комплексной амплитуды на два этапа, требование к минимизации затраченных вычислительных ресурсов компьютера и времени расчета становится не столь критичным параметром, т.к. «основной» этап вычисления происходит быстро и требует минимума вычислительных ресурсов. Кроме того, такое разделение позволяет выделить «основной» этап синтеза в отдельный программный модуль, не зависящий от внутренних параметров проекционного объектива. Этот программный модуль может быть инсталлирован в производственный вычислительный комплекс вместе с заранее рассчитанной таблицей соответствия, что позволяет снизить требования к вычислительной мощности производственного вычислительного комплекса.

Программный комплекс синтеза и цифрового восстановления СГСИ

Разработанный на основе описанного ранее метода синтеза голограмм программный комплекс можно условно разделить на четыре блока: блок ввода данных, блок вычисления оптимальных параметров синтеза, собственно синтез голограммы проектора и цифровое восста-

новление синтезированной голограммы. Входные данные включают в себя данные о структуре изображаемого объекта, его минимальный характеристический размер элемента, рабочую длину волны излучения, а также конструктивные параметры проекционной оптической системы. К последней группе относятся такие параметры системы как радиусы кривизны поверхностей, толщины линз и промежутков между ними и их показатели преломления, передний и задний рабочие отрезки, а также смещение плоскости голограммы от плоскости Гаусса. Отметим, что в силу большого количества входных данных, ввиду их частой повторяемости, целесообразным было реализовать их ввод посредством чтения из текстового файла. Помимо этого, такой способ ввода позволяет отказаться от реализации графического интерфейса программного комплекса с целью экономии вычислительных ресурсов и обеспечения возможности удаленного запуска на вычислительном комплексе. Внешний вид программного комплекса, запущенного на компьютере, представлен на рис. 4.

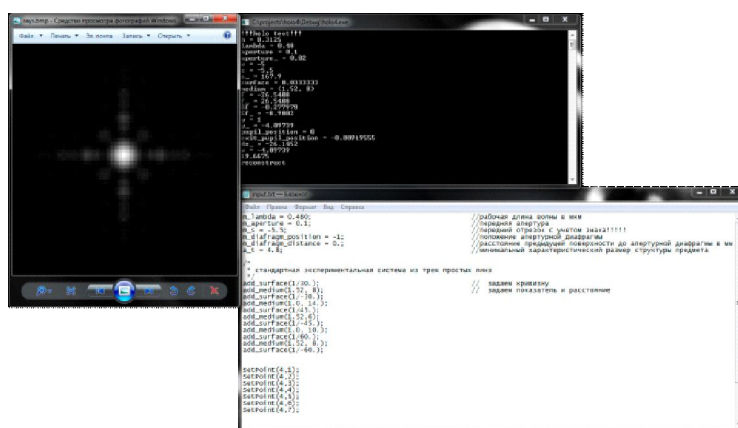


Рис. 4. Внешний вид программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов сфокусированного изображения

В программном блоке вычисления основных параметров синтеза производится расчет оптимальных значений периодов дискретизации голограммы и входного и выходного зрачков оптической системы, обеспечивающих дифракционное качество восстанавливаемого изображения. Кроме того, в данном блоке производится вычисление параксиальных характеристик оптической системы и проверка ее соответствия требуемым параметрам синтеза. Такая проверка заключается в обеспечении возможности трансляции излучения объектной волны на плоскость голограммы в пределах требуемого апертурного угла. Восстановление голограмм в данном программном комплексе осуществляется путем непосредственного расчета обратного хода действительных лучей через оптическую систему. Начальные значения амплитуды и фазы каждого луча определяются соответствующими значениями голографического поля, восстановленного в плоскости голограммы. Выходные данные о структуре голограммы-проектора или восстановленного изображения в комплексе формируются в виде текстового файла, либо в виде полутонового изображения в формате .bmp. Такой вывод данных обеспечивает возможность быстрой визуальной оценки полученных результатов перед их дальнейшей обработкой.

Испытание работоспособности программного комплекса

Испытания работоспособности программного комплекса проводились путем синтеза и последующего цифрового восстановления голограмм-проекторов бинарного амплитудного транспаранта представленного на рис. 5. Минимальный размер элемента его структуры составлял 0,4 мкм. В качестве проекционного объектива использовалась простая трехлинзовая рефракторная оптическая система из флюорита (CaF_2).



Рис. 5. Тест-объект для испытания программного комплекса

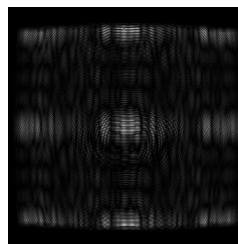


Рис. 6. СГСИ тестового объекта «ИТМО»

Значения основных параметров синтеза голограммы соответствовали рекомендациям, рассмотренным ранее. Исходя из них, угол падения опорной волны на плоскость голограммы составлял 10° , периоды дискретизации плоскостей предмета и голограммы – 0,4 мкм, периоды дискретизации входного и выходного зрачков оптической системы – 0,1 и 0,4 мкм соответственно. Выбранная длина волны излучения – 193 нм, соответствует рабочей длине волны эксимерного лазера, широко применяемого в настоящее время в полупроводниковом производстве. Размер линейной апертуры излучения в пространстве предметов составлял 3,2 мм, что, с учетом расстояния между предметом и проекционным объективом равным 5,5 мм, соответствовало числовой апертуре в пространстве предметов равной 0,5. Расстояние между выходным зрачком оптической системы и плоскостью голограммы составляло 123,8 мм, что при высоте выходного зрачка – 15,8 мм обеспечивало заднюю числовую апертуру равную 0,127. На рис. 6 представлена голограмма сфокусированного изображения, синтезированная для указанного выше тестового объекта. Размер голограммы, локализованной в пределах увеличенного изображения предмета, построенного оптической системой, составил всего 230 мкм. Особенностью СГСИ является отсутствие прямой зависимости между размером апертуры голограммы и минимальным характеристическим размером изображаемого элемента, свойственной голограммам-проекторам Френеля. Размер СГСИ в первую очередь зависит от линейного увеличения проекционного объектива, а также от размера пятна рассеяния, обусловленного его аберрациями. Эта особенность позволяет изготавливать СГСИ на подложках относительно малого размера, что делает их более выгодными с экономической точки зрения, т.к. цена заготовок для фотошаблонного производства в области дальнего ультрафиолетового диапазона спектра сильно зависит от их размера. Результаты восстановления голограммы представлены на рис. 7. Для количественной оценки качества восстановленное изображение подвергалось пороговой обработке (см. рис. 8). Как можно видеть, структура объекта восстанавливается без искажений. При этом допустимый интервал уровней порога (Δi_{\max}) составил 103 единицы.



Рис. 7. Восстановленное изображение



Рис. 8. Восстановленное изображение после порогового преобразования

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод об экспериментальном подтверждении справедливости сформулированных в работе требований, предъявляемых к выбору парамет-

ров синтеза СГСИ, о работоспособности и эффективности предложенного нами метода расчета поля объектной волны, о корректной работе программного комплекса и о возможности его применения для синтеза и восстановления СГСИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ehbets P., Herzig H., Kuittinen M., Clube F., Darbellay Y. High. Carrier-frequency fan-out gratings fabricated by total internal reflection holographic lithography // Opt. Eng. – 1995. – V. 34. – № 8. – P. 2377-2383.*
2. *Корешев С.Н., Ратушный В. П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения. // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 10. – С. 32-39.*
3. *Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 101. – № 6. – С. 1038-1042.*
4. *Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии. // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 9. – С. 29-34.*
5. *Гудман Дж. Введение в Фурье-оптику // Дж. Гудман. – М: Мир, 1970. – 364 с.*

SYNTHESIS OF FOCUSED IMAGE HOLOGRAM-PROJECTORS FOR PHOTOLITHOGRAPHY

Koreshev S.N., Korepin I.N.

*(Saint Petersburg State University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, Saint-Petersburg)*

The problem of synthesis focused image hologram-projectors, working together with the objectives of low quality is considered. Recommendations on the selection of synthesis parameters and display holograms that determine the quality of reconstructed images are formulated and scientifically based. It was found that the combined use of the hologram and the projection system can leads to the limit for optical characteristic minimum feature size of the photomask equal to the wavelength of reducing radiation. The method of synthesis of focused image holograms, based on the lookup tables was proposed. On the basis of this method a program system for synthesis and digital reconstruction of focused image holograms-projectors was developed. The possibilities and prospects of use this program system in solving problems of photolithography was shown.

ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А.

(Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза)

Одним из факторов, влияющих на качество изображения, формируемого оптической системой, включающей наряду с рефракционными линзами дифракционный оптический элемент (ДОЭ), является дифракция излучения в побочные дифракционные порядки. Очевидно, что суммарный уровень дифракционной эффективности (ДЭ) в побочных порядках тем меньше, чем выше ДЭ в рабочем дифракционном порядке. Сегодня наиболее технологичной и при этом обеспечивающей наивысший уровень ДЭ в первом рабочем дифракционном порядке является пилообразная рельефно-фазовая микроструктура ДОЭ. Поэтому все результаты исследований и выводы, представленные в настоящей работе, относятся к ДОЭ именно с такой микроструктурой.

В простейшем случае однослойной однорельефной пилообразной микроструктуры, выполняемой в выбранном оптическом материале, влиять на ДЭ можно только глубиной рельефа h (см. рис. 1). Здесь предполагается, что профиль пилообразного рельефа согласуется с фазовой задержкой, которую ДОЭ должен вносить в падающий волновой фронт, что обеспечит максимальную для выбранной глубины ДЭ независимо от числа зон Френеля в микроструктуре ДОЭ [1]. Напомним, что применительно к пилообразной рельефно-фазовой микроструктуре ДЛ под термином «зона Френеля» понимается участок микроструктуры, в пределах которого фазовая задержка, вносимая микроструктурой в падающий на нее волновой фронт, изменяется от 0 до 2π [2, 3].

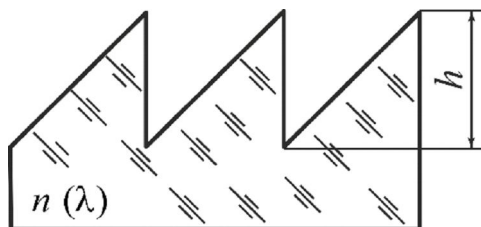


Рис. 1. Однослойная однорельефная пилообразная дифракционная микроструктура

Оптимальная глубина рельефа однослойной однорельефной пилообразной микроструктуры $h \approx 1$ мкм. Следовательно, при легко достижимом относительном минимальном периоде в микроструктуре ДОЭ $\Lambda_{\min}/h > 20 \div 40$, совпадение оптимальных значений глубин рельефа и оценок ДЭ, получаемых в рамках скалярной теории дифракции (СТД) и строгой теорией дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла методом связанных волн [rigorous coupled-wave analysis (RCWA)], практически гарантировано [4-6]. Сразу же заметим, что условие $\Lambda_{\min}/h > 20 \div 40$ легко достижимо как с точки зрения технологии изготовления микроструктуры, так и с точки зрения обеспечения с помощью ДОЭ требуемой коррекции aberrаций. Учитывая вышеизложенное расчет ДЭ, выбор оптимальной глубины рельефа, оценка предельно допустимой ширины спектрального диапазона и интервала углов падения излучения на микроструктуру производились в рамках СТД.

Зависимость ДЭ пилообразной однослойной однорельфной микроструктуры в любом порядке дифракции от глубины рельефа h , длины волны λ , и угла падения излучения θ можно приближенно оценить по известной формуле (см., например, [2]):

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin \left[\pi \left(m - \Delta l / \lambda \right) \right]}{\pi \left(m - \Delta l / \lambda \right)} \right\}^2,$$

где m – номер дифракционного порядка, Δl – приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля, λ – длина волны падающего на микроструктуру излучения. Как следует из формулы (1) при стремлении нормированного на длину волны приращения оптического пути к единице ДЭ также стремится к единице в первом дифракционном порядке ($m = 1$), и ниже именно этот порядок будет считаться рабочим. Приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля имеет вид [7]:

$$\Delta l = h \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right).$$

Здесь n – показатель преломления материала подложки на длине волны λ . Из формул (1) и (2) следует, что график ДЭ представляет собой выпуклую кривую с максимумом, который может достигать единицы. При этом длина волны, на которую будет приходиться максимум, а также значения ДЭ на краях выбранного спектрального диапазона и в пределах некоторого интервала углов падения излучения будут определяться глубиной рельефа, шириной спектрального диапазона и интервала углов падения излучения.

Установив значения ДЭ на краях рабочего спектрального диапазона, гарантирующие отсутствие негативного влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения и, прежде всего, гало, можно будет в каждом конкретном случае обоснованно принять решение о возможности использования однослойной однорельфной микроструктуры и выбрать глубину ее рельефа.

С целью определения допустимого падения ДЭ на краях рабочего спектрального диапазона были проведены исследования изображений двухшпального тест-объекта и малоразмерного отверстия ирисовой диафрагмы, формируемых рефракционно-дифракционным объективом, представляющим собой пластмассовую гибридную асферическую линзу (ГАЛ) Plastic Hybrid Aspheric Lens No 5-999, серийно производимую фирмой Edmund Optics [8]. Размер тест-объекта и передний отрезок выбирались из условия обеспечения углового поля $2\omega \leq 3^\circ$ и приемлемых для анализа изображения линейного увеличения и остаточных aberrаций. Двухшпальный тест-объект, состоящий из матовых белых шпал на фоне плоского экрана покрытого черным бархатом освещался рассеянным солнечным светом (освещенность в его плоскости составляла 500÷700 лк), а малоразмерное отверстие ирисовой диафрагмы освещалось на просвет люминесцентной лампой дневного света (освещенность в плоскости отверстия составляла 1300 лк).

Распределение ДЭ микроструктуры ГАЛ по длинам волн в первом рабочем порядке дифракции при нормальном падении излучения на элемент представлено на рис. 2.

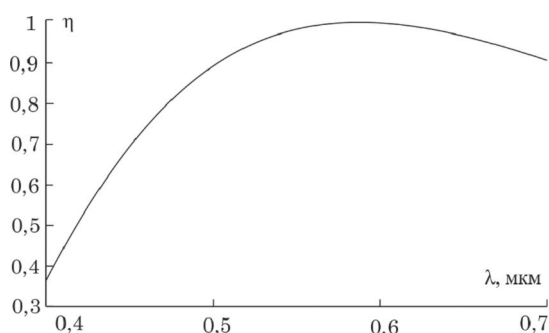


Рис. 2. Распределение ДЭ микроструктуры ГАЛ по длинам волн в первом рабочем порядке дифракции

Фотографии изображений тест-объектов, сформированные ГАЛ на ПЗС-матрице и наблюдаемые на экране компьютера, представлены на рис. 3. Они показывают, что при использовании светофильтра, отсекающего ту часть коротковолнового излучения, на которой ДЭ ГАЛ опускается ниже 0,85, гало в изображении не наблюдается. Причем оно не наблюдается как при экспозиции, лежащей на линейном участке экспозиционной кривой вблизи точки насыщения матричного фотоприемника (рис. 3, в), так и при экспозиции, лежащей за точкой насыщения (рис. 3, з).

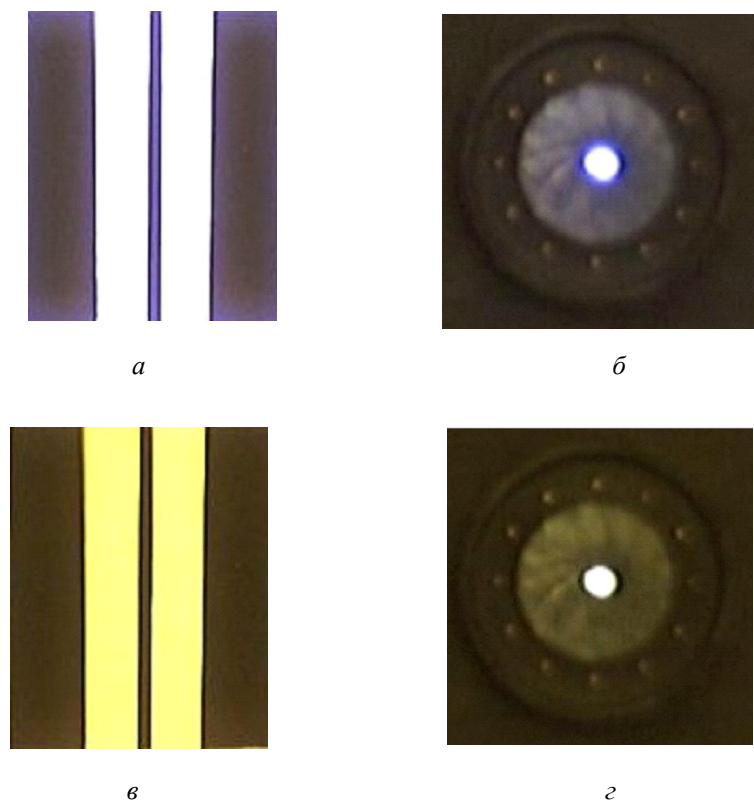


Рис. 3. Фото двухщельного (а, в) и одноотверстного (б, з) тест-объектов, полученные без светофильтра (а, б) и со светофильтром ЖС17 (в, з).

Отсутствие гало в изображениях, представленных на рис. 3, в и 3, з, свидетельствует о том, что если в пределах используемого спектрального диапазона кривая ДЭ является выпуклой, а ее характерные точки удовлетворяют условию: $\eta \approx 1$ в одной из точек внутри спектрального диапазона, $\eta \geq 0,85$ на одном из его краев и $\eta \geq 0,9$ на другом, то побочные дифракционные порядки не окажут негативного воздействия на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой. Причем это справедливо во всем интервале освещенностей, которые рекомендуются для фотосъемки любительскими цифровыми камерами.

Расчеты, произведенные по формулам (1) и (2), показали, что вышеоговоренные условия отсутствия гало в изображении, формируемом оптической системой с ДЭ, могут быть выполнены в случае пилообразной однослойной однорельефной микроструктуры одновременно не только в достаточно широком спектральном диапазоне, но и в весьма широком интервале углов падения излучения (см. рис. 4 и таблицу).

Параметры пилообразных однослойных однорельефных микроструктур, обеспечивающие отсутствие гало в спектральном диапазоне $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} = \lambda_C = 0,65626$ мкм.

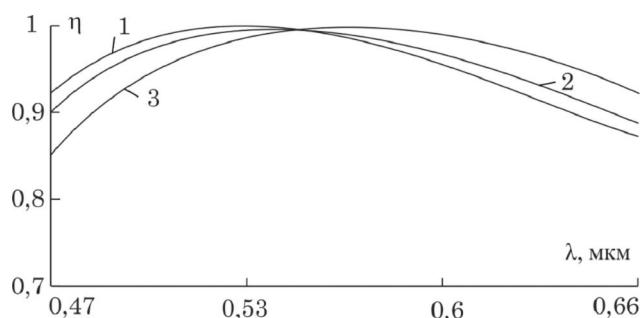


Рис. 4. Спектральные зависимости ДЭ для ряда значений углов падения излучения на микроструктуру, выполненную в поликарбонате (РС):
 1 – при $\theta = 0^\circ$; 2 – при $\theta = 15^\circ$; 3 – при $\theta = 25^\circ$

Оптический материал микроструктуры	Глубина рельефа h , мкм	λ_{\min} , мкм	Максимальный угол падения излучения θ_{\max} , град
AL-6263-(ОКР4НТ)	0,836	0,477	25,7
M-PCD51	0,886	0,463	25,4
РС	0,901	0,472	25,0
M-FCD500	0,948	0,468	25,0
M-FCD1	1,054	0,462	24,5
PMMA	1,067	0,465	24,4

Таким образом, при использовании в ограниченном видимом спектральном диапазоне ДОЭ с однослойной однорельефной микроструктурой можно рассчитывать на ДЭ, обеспечивающие отсутствие негативного влияния на качество формируемого изображения побочных дифракционных порядков при углах падения излучения на микроструктуру до $\theta_{\max} \approx 25^\circ$.

При более высоких требованиях к качеству изображения и, тем более, в более широком спектральном диапазоне, например, расширенном видимом ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) или диапазоне, включающем видимое и ближнее ИК-излучение ($0,4 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм), переход, как минимум, к двухслойной одно- или двухрельефной микроструктуре неизбежен. Такие микроструктуры, как показано в работах [4-6], способны обеспечить ДЭ не ниже 0,95 в пределах расширенного спектрального диапазона при углах падения излучения на микроструктуру до $\theta_{\max} \approx 15^\circ$. В этом случае побочные дифракционные порядки не будут препятствием даже для профессиональной фотосъемки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грейсук Г.И., Ежов Е.Г., Калашиников А.В., Левин И.А., Степанов С.А. Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113(4). – С. 468-473.
2. Бобров С.Т., Грейсук Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
3. Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. и др. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В.А. Соффера. // М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
4. Greisukh G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A., Usievich B.A. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // Optics Communication. – 2015. – V. 338. – P. 54-57.

5. Грейсух Г.И., Данилов, В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 5. – С. 56-61.

6. Грейсух Г.И., Данилов, В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трехслойными микроструктурами // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 6. – С. 118-125.

7. Buralli D.A., Morris G.M., Rogers J.R. Optical performance of holographic kinoforms // Appl. Opt. – 1989. – V. 28. – No. 5. – P. 976-983.

8. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200>.

THE DIFFRACTION EFFICIENCY AND THE QUALITY OF THE IMAGE FORMED BY REFRACTIVE-DIFFRACTIVE OPTICAL SYSTEM

Greisukh G., Ezhov E., Kazin S., Stepanov S.

(Penza State University of Architecture and Construction, Penza)

One of the factors affecting the quality of the image formed by the optical system with a diffractive optical element (DOE) is a side diffraction orders. Obviously, the total level of diffraction efficiency (DE) of the side diffraction orders will be the lower the higher the DE in the working diffraction order.

The sawtooth relief-phase microstructure of the DOE is the most technologically advanced today. Besides, it provides the highest level of DE in a first operating diffraction order. Therefore, all research results and conclusions presented in this paper relate to the DOE with such microstructure.

We have experimentally shown that when the following conditions are adverse, negative effect on the image quality of the side diffraction orders (in particular halo) will be missing:

- the curve of DE should be convex, and its maximum should be close to the unity;
- values of DE should not fall below 0.85 at one edge of the spectral band and 0.9 on the other.

If these conditions are met the halo will be guaranteed to be absent within the entire range of lighting, which is recommended for shooting amateur digital cameras.

Note that these conditions can be met in case of a monolayer and mono-relief sawtooth microstructure simultaneously not only in a sufficiently broad spectral range, but in a very broad range of angles of incidence. Therefore, when using the DOE with such microstructure in a limited visible spectral range we can expect a DE that will ensure the absence of a halo at angles of incidence on the microstructure to 25°.

If the image quality requirements are more stringent, and the spectral range is very wide ($0.4 \leq \lambda \leq 0.7$ мкм or $0.4 \leq \lambda \leq 0.9$ мкм), the transition to at least bilayer one or two relief microstructure inevitable. Such microstructures (see, for example, [1]) are able to provide the DE not less than 0.95 within the extended spectral range at angles of incidence to 15°. In this case, the side diffraction orders will not be an obstacle even for professional photography.

The RF's Ministry of Education and Science, under the state of the scientific mission, financially supported this work.

REFERENCE

1. Greisukh G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A., Usievich B.A. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // Optics Communication. – 2015. – V. 338. – P. 54-57.

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ДРУГИХ МИКРОЧАСТИЦ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ – ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Дёмин В.В

(Томский государственный университет, г. Томск)

Обозначены основные задачи при исследовании голографическими методами микрочастиц, расположенных в объёме среды. Рассмотрен пример обработки голограмм планктонных частиц и извлечения информации. Показаны перспективы развития алгоритмов обработки цифровых голограмм частиц.

Во многих областях науки и техники исследуются частицы, расположенные в объёме среды. Такими частицами могут быть аэрозоли, двухфазные потоки, оседающие частицы, технологические среды, продукты горения, планктон, биологические ткани, эритроциты и другие [1-8]. Цифровая голография обладает уникальными возможностями по сравнению с другими методами, поскольку позволяет в динамике регистрировать объём большой глубины и обеспечить высокое разрешение одновременно, при этом глубина регистрируемого пространства и разрешение взаимосвязаны. Достигаемые характеристики метода определяются используемой оптической схемой, геометрическими и оптическими свойствами объекта исследования (частиц и среды), способом базирования голографической установки, а также алгоритмами извлечения информации. Например, использование осевой схемы регистрации цифровых голограмм без применения дополнительных оптических систем позволяет выполнить детальное исследование (размер, форма, расположение в пространстве) частиц размером 50 мкм и более.

Процесс получения информации на основе голографических данных происходит в два этапа – регистрация цифровой голограммы и восстановление и обработка цифровых голографических изображений. В настоящее время процесс регистрации цифровых голограмм достаточно хорошо отработан. Напротив, обработка и извлечение информации из цифровых голограмм является задачей актуальной, требующей исследования, поскольку традиционные методы обладают рядом недостатков. Существует необходимость разработки методов, программных средств и устройств автоматизации процесса обработки и извлечения информации из цифровых голограмм.

По цифровым изображениям частиц, восстановленным из цифровой голограммы, можно определить форму, размер и положение в объёме каждой зарегистрированной частицы. Используя временную видеопоследовательность цифровых голограмм, можно сформировать так называемое голографическое видео, позволяющее исследовать динамику движения частиц, построить трёхмерную траекторию движения и определить изменение вектора скорости в заданные моменты времени. В случае исследования ансамбля частиц, обычно требуется определить их концентрацию, построить распределение частиц по размерам, формам и положению в пространстве.

Традиционный метод извлечения информации из цифровых голограмм состоит из последовательного выполнения следующих операций: послойное восстановление изображений объёма среды из цифровой голограммы, определение областей интереса (областей, содержащих изображения частиц), уточнение положения плоскости наилучшей фокусировки (ПНФ) изображения каждой частицы, восстановления голографического изображения каждой частицы в ПНФ и последующего определения и расчёта требуемых характеристик, согласно решаемой задаче.

При извлечении информации из цифровых голограмм частиц, как правило, решаются следующие задачи:

1. Повышение качества изображения и точности определения характеристик отдельных частиц объёма.

2. Автоматизация процесса визуализации и извлечения информации о зарегистрированных на голограмме частицах.

3. Повышение быстродействия работы алгоритма обработки голографических данных, при этом желателен режим реального времени.

Решение первых двух сформулированных задач реализовано в ряде работ, например, [9-11]. Повышение точности определения характеристик частиц объёма достигнуто за счёт предварительной обработки восстановленных изображений и уточнения продольной координаты каждой частицы объёма методом граничного контраста, обеспечивающего погрешность определения положения плоскости наилучшей фокусировки не хуже 200 мкм. Автоматизация извлечения информации из цифровых голограмм реализована за счёт использования двумерного отображения объёмного голографического изображения, которое позволяет исключить процедуру определения области интереса, выполняемую традиционно в ручном режиме.

Отработка методов исследования микрочастиц голографическими методами производилась на примере планктона. Данные частицы являются полупрозрачными, объёмными, имеют сложную форму и расположены в воде на этапе регистрации голограммы. При этом изображения отличаются низким контрастом и присутствием шумов и спеклов, которые осложняют работу с ними. Если разработанные алгоритмы обработки и извлечения информации позволяют работать со слабоконтрастными изображениями частиц сложной формы (планктонные частицы), то это означает, что они применимы и могут быть легко адаптированы для других частиц при решении широкого класса задач.

На рис. 1 приведён пример обработки цифровых голограмм планктонных частиц. На рис. 1, *а* представлено сформированное двумерное отображение голографического изображения объёма воды, содержащего планктон, на котором изображения каждой частицы сфокусированы и имеют резкую границу. При этом информация о пространственном положении каждой частицы объёма сохранена в памяти компьютера, и может быть представлена, например, в виде распределение частиц в пространстве (рис. 1, *б*).

Одно из наиболее существенных преимуществ цифровой голографии заключается в возможности исследования динамики движения частиц за счёт регистрации и последующей обработки видеопоследовательности голограмм. На рис. 1, *в* в качестве примера приведена трёхмерная траектория движения планктонной особи, изображение которой проиллюстрировано на рис. 1, *в*, *д*. Траектория получена по видеопоследовательности из 15 голограмм. На рис. 1, *д* представлена иллюстрация вращения частицы относительно центра тяжести изображения.

Приведенный пример показывает лишь часть огромных (зачастую избыточных) возможностей получения информации с голограммы. Поэтому актуальны методы извлечения и визуализации определенной, заранее обозначенной информации, см., например, [10, 11]. Наименее изученной здесь является проблема идентификации планктонных частиц по их голографическим изображениям [12].

Кроме этого, одним из востребованных направлений исследований является повышение скорости обработки голографических данных. В настоящее время обработка голограммы размером 2048 x 2048 пикселей, на которой зарегистрирован объём с частицами с глубиной сцены 150 мм, на компьютере средней производительности занимает не более 10 с. В то же время в работе [13], описана реализация такого алгоритма на GPU, что позволит реализовать обработку голограмм в режиме «реального времени» (например, 25 голограмм в секунду).

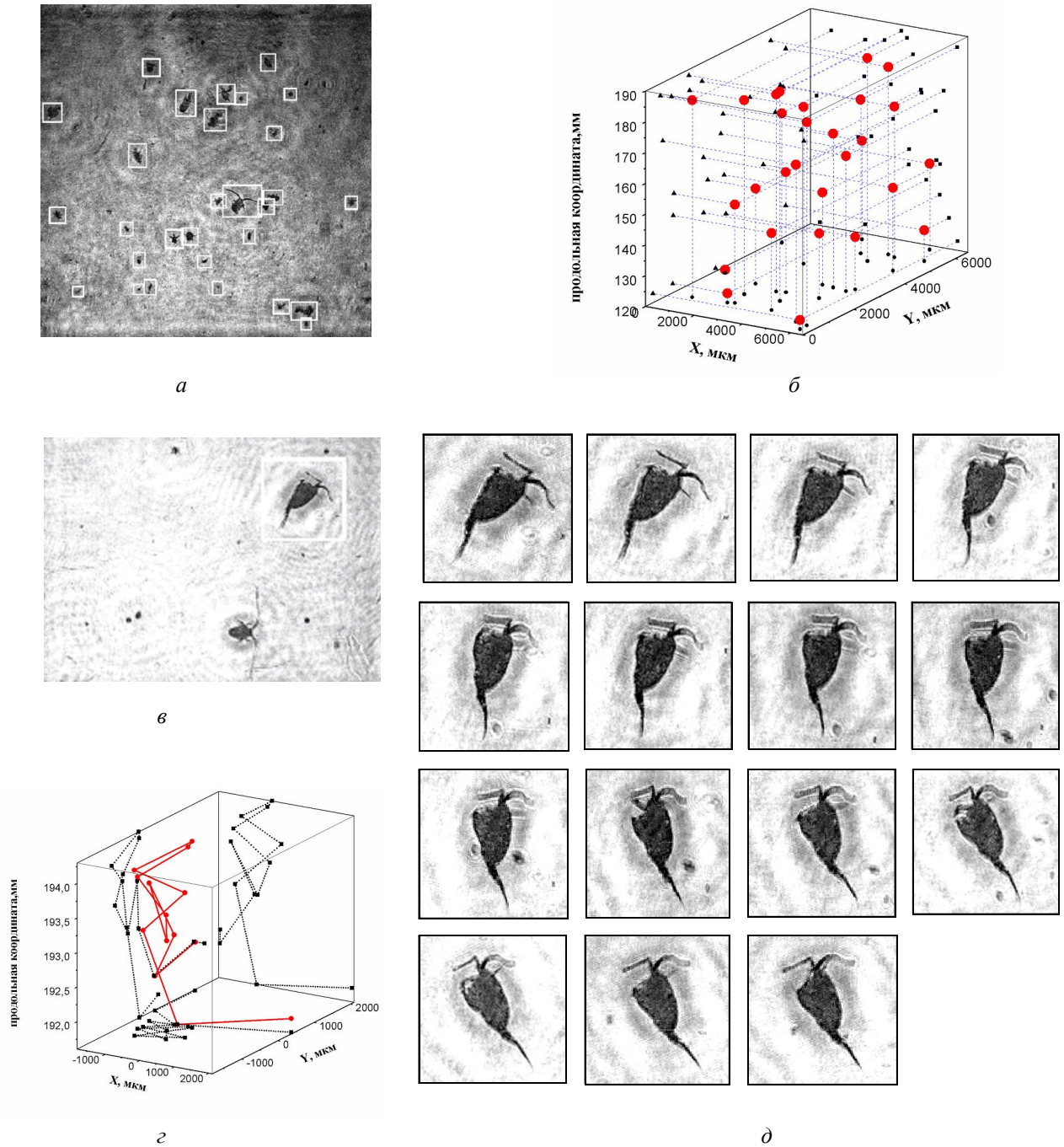


Рис. 1. Пример извлечения информации из цифровых голограмм планктонных частиц
 а – двумерное отображение голографического изображения планктона;
 б – построенное на его основе распределение частиц в пространстве;
 в, г – трёхмерная траектория движения частицы, построенная на основе видеопоследовательности голограмм;
 д – иллюстрация вращения частицы относительно центра тяжести для приведённой траектории движения

Таким образом, в докладе рассмотрены основные задачи и проблемы, возникающие при изучении микрочастиц в воде, обозначены наиболее перспективные направления для исследования. Прежде всего, это автоматизация процессов записи и восстановления цифровых голограмм, ускорение процесса извлечения информации, адаптация методов цифровой голографии к задачам исследования частиц в различных средах и для различных способов базирования голографической установки (погружаемая, встроенная в технологический процесс, предназначенная для самолетного базирования, лабораторный вариант и т.п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин В.В., Степанов С.Г. Исследование ориентационных характеристик модельных кристаллических аэрозолей голографическим методом // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 9. – С. 833-836.
2. Katz J., Sheng J. Application of Holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics // Annu. Rev. Fluid Mechanics. – 2010. – Vol. 42. – P. 531-555.
3. Zhang J., Zhang J., Tao B., Katz J. Turbulent flow measurement in a square duct with hybrid holographic PIV // Exp. Fluids. – 1997. – Vol. 23. – P. 373-381.
4. Dyomin V.V., Olshukov A.S., Naumova E.Yu., Melnik N.G. Digital Holography of Plankton / / Atmospheric and Oceanic Optics. – 2008. – Vol. 21. – N. 12. – P. 951-956.
5. Fugal J.P., and Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Tech., 2, 259-271, 2009.
6. Sun H., Benzie P.W., Burns N. Underwater digital holography for studies of marine plankton / // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2008. – Vol. 366. – P. 1789-1806.
7. Choi Y., Lee S. Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy // Optical Society of America. 2009. – Vol. 48, № 16. – P. 2983-2990.
8. Sun H., Song B., Dong H. Visualization of fast-moving cells in vivo using digital holographic video microscopy // Journal of Biomedical Optics. –2008. –Vol. 13, № 1. – P. 014007-1-014007-9.
9. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Сравнение методов определения плоскости наилучшей фокусировки изображения частицы, восстановленного с цифровой голограммы // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7. – С. 90-97.
10. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Двумерное представление цифрового голографического изображения объема среды с частицами как способ отображения и обработки информации о частицах // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 7. – С. 58-65.
11. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Методы обработки и извлечения информации с цифровых голограмм частиц и их практическое применение // Известия вузов. Радиофизика. – 2014. – Т. 57. – № 8/9. – С. 597-607.
12. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Особенности процедуры распознавания планктонных частиц по изображениям, восстановленным с цифровых голограмм // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 10. – С. 897-903.
13. Reid I.D., Nebrensky J.J., Hobson P.R. Challenges in using GPUs for the reconstruction of digital hologram images // 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 368 012025.

DIGITAL HOLOGRAPHY OF BIOLOGICAL AND OTHER PARTICLES OF AQUEOUS SOLUTIONS: CHALLENGES AND PROSPECTS

Dyomin V.V.

(National Research Tomsk State University)

The main challenges of investigation of particles located in the volume of a medium with the use the holographic methods are designated. An example of plankton particles holograms processing and the information extraction is considered. The prospects of the particles digital holograms processing algorithms are discussed.

REFERENCES

1. Dyomin V.V., Stepanov S.G. Study of Orientation Characteristics of Model Crystalline Aerosols by Holographic Method // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2000. – Vol. 13, N 9. – P. 773-776.

2. *Katz J., Sheng J.* Application of Holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics // *Annu. Rev. Fluid Mechanics.* – 2010. – Vol. 42. – P. 531-555.
3. *Zhang J., Zhang J., Tao B., Katz J.* Turbulent flow measurement in a square duct with hybrid holographic PIV // *Exp. Fluids.* – 1997. – Vol.23. – P. 373-381.
4. *Dyomin V.V., Olshukov A.S., Naumova E.Yu., Melnik N.G.* Digital Holography of Plankton / *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 2008. – Vol. 21. – N. 12. – P. 951-956.
5. *Fugal J.P., and Shaw R.A.* Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // *Atmos. Meas. Tech.*, 2, 259-271, 2009.
6. *Sun H., Benzie P.W., Burns N.* Underwater digital holography for studies of marine plankton/ // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2008. – Vol. 366. – P. 1789-1806.
7. *Choi Y., Lee S.* Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy// *Optical Society of America.* 2009. – Vol. 48, №. 16. – P. 2983-2990.
8. *Sun H., Song B., Dong H.* Visualization of fast-moving cells in vivo using digital holographic video microscopy // *Journal of Biomedical Optics.* – 2008. – Vol. 13, № 1. – P. 014007-1-014007-9.
9. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* A comparison of methods for evaluating the location of the best focusing planes of particles images reconstructed from digital holograms // *Russian Physics Journal.* – 2013. – Vol. 56, Issue 7. – P. 822-830
10. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* Two-dimensional representation of a digital holographic image of the volume of a medium with particles as a method of depicting and processing information concerning the particles // *Journal of Optical Technology,* 2013, – Vol. 80. – No. 7, – P. 45-456.
11. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* Methods of Processing and Retrieval of Information from Digital Particle Holograms and Their Application // *Radiophysics and Quantum Electronics.* – 2015. – Vol. 57. – Issue 8-9. – P. 533-542.
12. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* Peculiarities of the Procedure of Plankton Particles Recognition in Images Reconstructed from Digital Holograms // *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 2013. – Vol. 26. – No. 10. – P. 897-903 [in Russian].
13. *Reid I.D., Nebrensky J.J., Hobson P.R.* Challenges in using GPUs for the reconstruction of digital hologram images // 2012 *J. Phys.: Conf. Ser.* 368 012025.

СЕКЦИЯ 1

**РАЗРАБОТКИ И ТЕХНОЛОГИИ
В ОБЛАСТИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ**

SECTION 1

**ENGINEERING
AND TECHNOLOGY IN THE FIELD
OF SECURITY HOLOGRAMS**

НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЗАЩИТНОЙ ГОЛОГРАФИИ: КОМБИНИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММЫ НА ОСНОВЕ АНАЛОГОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ 3D ОБЪЕКТА

*Яновский А.В., Кайтуков Ч.Б.
(ФГУП «НТЦ "Атлас"», г. Москва)*

Рассматривается новый подход к созданию защитных голограмм на основе разработки комбинированной голограммы нового поколения, совмещающей в себе цифровую и аналоговую голограммы и организованной на использовании в качестве основного изображения крупноформатного объёмного аналогового изображения 3D-объекта. Анализируются проблемы стоящие перед современной защитной голографией и присущие ей недостатки. Рассматриваются технические и технологические задачи, подлежащие решению при создании подобных комбинированных голограмм.

На общем фоне разнообразных защитных средств, призванных отсечь контрафактное изделие от подлинного выделяется защитная голография, которая, благодаря своей наглядности и высокому защитному потенциалу, является надёжным и оригинальным способом в борьбе с поддельной продукцией и документацией. Смысл защитной голографии состоит в выпуске и последующем нанесение эксклюзивных голографических защитных знаков – защитных голограмм, на сопровождаемом изделии или документе.

Сущность защитной голограммы заключается в специально заложенной на стадии разработки закодированности и индивидуальности архитектуры её организационного построения, а так же в технологической сложности изготовления, препятствующие её полноценной несанкционированной имитации.

Ранее, в сообщении [1] уже говорилось о вновь возникших обстоятельствах, при которых голограмма, первоначально призванная быть основным инструментом защиты продукции от подделки, постепенно, по мере роста числа высокотехнологичных голографических производств, а главное в виду возникновения потребности в неучтённых тиражах, сама стала объектом подделки, нередко успешно замещающим собой подлинную голограмму.

Причина такой «успешной подмены» видится в следующих обстоятельствах:

- недостаточная, несмотря на все прилагаемые усилия, закрытость ЗГ, позволяющая сымитировать её на достаточно высоком техническом и дизайнерском уровне подобия;
- возможность упрощённой подмены легальной защитной голограммы сходным по внешнему виду аналогом;
- отсутствие должного контроля подлинности защитной голограммы ввиду сложности проведения её первичной визуальной идентификации;

Из вышесказанного следует, что существующий в настоящее время идеологический подход к формированию понятия «защитная голограмма» не полностью оправдывает себя и традиционные способы защиты голограммы, базирующиеся на использование микро- и наноэлементов, скрытых изображений в настоящее время отчасти исчерпали себя, потеряли свою экс-

клюдивность и уже не способны в полной мере обеспечить конфиденциальность защитной голограммы. Более того, явная визуальная перенасыщенность голограмм однотипными вспомогательными элементами и особенно гильошными сетками с кинетическими эффектами во многом лишает голограмму столь необходимой визуальной индивидуальности, делает их похожими одна на другую, а при зрительном рассмотрении нередко превращает в трудно воспринимаемую смесь беспорядочных цветных переливов.

Проведение чрезвычайно важной и определяющей первичной визуальной идентификации и опознания подобных защитных голограмм, без привлечения профессиональных контролёров и применения специальных приборов для оценки соответствия отдельных оригинальных «секьюрити-элементов» как крайне затруднительно, так и ненадёжно. А окончательную, достоверную оценку их подлинности может дать только требующая длительного времени специальная техническая экспертиза.

Для дальнейшего подъема престижа защитных голограмм, повышения их защитного потенциала, а так же для удобства работы с ними предлагается при организационном построении архитектуры защитных голограмм перенести акценты с защитных элементов микро- и макроуровня, традиционно «спрятанных» внутри голограммы на хорошо зрительно воспринимаемые и узнаваемые крупноформатные защитные элементы (изображения). Они должны стать основой её дизайнерского построения – основным изображением голограммы, её композиционным и смысловым центром, обладать защитными свойствами. Для этого потенциальные изображения должны быть эксклюзивны, технологически сложны в исполнении, а так же обладать так называемыми публичными признаками (высокая степень узнаваемости у любого вероятного наблюдателя), не требующими для своей идентификации ни особых навыков, ни временных затрат.

Сформулируем дополнительные, более расширенные требования, которые по нашему мнению, должны послужить основой для создания нового организационного построения архитектуры защитной голограммы и тем самым обеспечить как более высокий её защитный потенциал, так и условия для её достоверной визуальной идентификации и опознание на уровне впечатления – первый уровень идентификации:

1. Композиционное построение защитной голограммы не должно быть перенасыщено вспомогательными изображениями, а должно основываться на формировании крупноформатного основного изображения, обладающего как защитными, так и публичными признаками, обеспечивающего её доступную и достоверную визуальную идентификацию и опознание на уровне впечатления – первый уровень идентификации.

2. Основное изображение защитной голограммы должно быть максимально стойким перед несанкционированной имитацией.

3. Основное изображение защитной голограммы должно иметь возможность оперативного обновления.

4. Защитная голограмма должна сочетать в себе как можно больше защитных элементов выполненных по различным технологиям – ориентация на комбинированную систему построения защитных голограмм.

5. Защитная голограмма должна быть достаточно крупной, с чётко выраженной и хорошо рассматриваемой графикой всех воспроизводимых изображений (особенно основного).

Вновь выдвинутым требованиям к защитным голограммам может соответствовать предлагаемая к ознакомлению оригинальная разработка комбинированной голограммы (КГ) нового поколения, совмещающая в себе цифровую и аналоговую голограммы.

В конце 90-х годов прошлого столетия, исходя из возрастающих требований рынка, остро нуждающегося в защитных голограммах более высокого уровня, была создана и успешно внедрена в практику в качестве таковой рельефно-фазовая голографическая защитная метка [2].

Позже, за ней закрепилось другое, более понятное и точное определение – комбинированная голограмма. Представляемая КГ базировалась на основе уже широко используемых к тому времени компьютерно-синтезированных или цифровых голограммах, изготавливаемых по технологии электронно-лучевой литографии (e-beam lithography) и представляла собой симбиоз цифровой и аналоговой голограмм, записанных на едином носителе.

На заключительном этапе создания оригинации организационное построение КГ представляло собой двухслойную структуру, в которой, посредством оригинальных технологических операций, планарное изображение аналоговой голограммы визуально располагалось за плоскостью изображения ранее записанной цифровой голограммы в зонах свободных от неё и, не нарушая его целостности, образовывало совместно с ним единую изобразительную композицию. Основное изображение на данной КГ представлялось цифровой голограммой, а изображение, создаваемое аналоговой голограммой, носило вспомогательный характер.

Разработанная технология КГ позволила не только повысить изобразительные и имиджевые качества цифровых голограмм, но, что самое главное, теперь уже в виде КГ поднять их защитный потенциал на более высокий уровень. С появлением КГ появилась возможность перейти от двумерных цифровых 2D-голограмм к более привлекательным и совершенным многоплановым 2D/3D-голограммам [3, 4]. Это дало возможность получать на КГ не только ощущение объёмности в изображении, но и дополнительно образовывать визуальные защитные эффекты. Однако данный метод не был в состоянии организовать на голограмме объёмные изображения реальных объектов.

Появление на рынке голографической продукции КГ явилось на тот период времени, безусловно, качественным прорывом в голографическом производстве, и они пользовались высоким спросом у потребителей.

Однако, вследствие постепенного совершенствования аппаратной базы и программного обеспечения повысился и качественный уровень создаваемых цифровых голограмм, проявившийся в возможности реализовать несложную двухплановую композицию в виде 2D/3D голограммы передающую эффект объёмности изображения за счет возникновения иллюзии заглубления заднего плана. Это обстоятельство, с учётом сложности изготовления КГ и их сравнительно высокой стоимости, привело к постепенному снижению их привлекательности и, как следствие, к падению коммерческого интереса к ним.

Технологический и дизайнерский подход к организационному построению первых КГ, заключающийся в расположении изображения создаваемого цифровой голограммой исключительно на I плане, а изображение, создаваемое аналоговой голограммой – на заднем плане, а так же невозможность организовать на голограмме объёмные изображения реальных объектов, разумеется, ограничивал её изобразительные и защитные свойства.

В сообщении [1] предлагалось к ознакомлению более совершенная КГ II-го поколения, выполненная по схожей, но более сложной и оригинальной технологии, которая позволяет создавать иную конфигурацию организационного построения КГ и поместить изображение аналоговой голограммы на I план.

На рис. 1 для сравнения представлены условные графические схемы планетарного построения КГ I-го и II-го поколений.

При непосредственной разработке организационного построения КГ II-го поколения обсуждались две проблемы:

1. Выбор основного изображения.
2. Способ записи и расположение привлекаемого заднего плана за основным изображением КГ.

Очевидно, что для организации благоприятных условий, обеспечивающих надёжную и достоверную визуальную идентификацию и опознание защитной голограммы на уровне

впечатления, ключевым моментом является правильный и мотивированный выбор основного изображения, представляемого на голограмме. Это изображение, являясь композиционным и смысловым центром голограммы, вокруг которого выстраиваются все остальные её элементы, должно быть хорошо узнаваемо и известно широкому кругу потенциальных потребителей, не вызывать у них сомнений в подлинности защитной голограммы (отвечать требованиям «публичного изображения»). Для правильного выбора требуемого вида изображений рекомендуется исходить из основ физиологии человеческого зрения и теории зрительного распознавания образов [5].

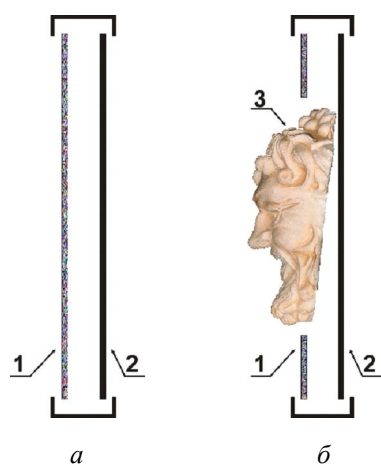


Рис. 1. Условная графическая схема планетарного построения комбинированных голограмм I-го (а) и II-го (б) поколений:
 1 – цифровая голограмма; 2 – аналоговая голограмма – задний план;
 3 – аналоговое изображение 3D-объекта (аналоговая 3D-голограмма) – основное изображение КГ голограммы

По замыслу разработчиков таким условиям наиболее полно соответствуют обладающие естественной цветопередачей и высокой четкостью крупноформатные объёмные изображения 3D-объектов, воспроизводимые аналоговой голограммой. Подобные изображения создают в сознании наблюдателя полноценное ощущение объёмно-пространственного образа исходного объекта и поэтому наиболее адекватно и реалистично воспринимаются им, обеспечивая тем самым достоверную и надёжную их идентификацию, а, следовательно, и идентификацию всей защитной голограммы.

В соответствии с вышеприведёнными требованиями основное изображение на представляемых защитных голограммах должно выполнять не только декоративную, но и защитную функцию. Для этого оно само по себе должно являться эксклюзивным и конфиденциальным в зависимости от индивидуальности и раритетности выбранного исходного 3D-объекта. В этом случае объёмные голографические изображения чрезвычайно трудно поддаются вторичному несанкционированному изготовлению (подделке) на высоком качественном уровне ввиду отсутствия у её исполнителя подлинного исходного 3D-объекта.

Для повышения достоверности и надёжности идентификации голограмм с объёмным представлением изображения 3D-объектов необходимо присутствие на них заднего (фонового) плана, усиливающего визуальное ощущение пространственности изображения объектов и глубины сцены за ним [6, 7]. На этапе разработки КГ II-го поколения было решено представить задний план аналоговым изображением планарного объекта.

На основании вышесказанного была разработана и создана КГ II-го поколения, на которой композиционно и технологически совмещены изображения, выполненные по технологиям цифровой и аналоговой голографии (рис. 2).

Представленная КГ II-го поколения являлась промежуточным этапом перед созданием более совершенной, конфиденциальной и сложной в исполнении КГ III-го поколения, работа над созданием которой ведётся в настоящее время (рис. 3).



Рис. 2. Изображение КГ II-го поколения на основе объёмного аналогового изображения 3D-объекта. Представлена оригинация голограммы на никелевой мастер-матрице

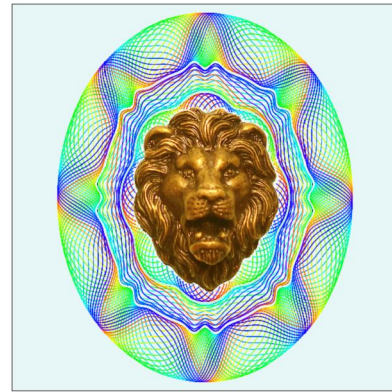


Рис. 3. Изображение комбинированной голограммы III-го поколения на основе объёмного аналогового изображения 3D-объекта

В КГ III-го поколения, используя современные возможности записи цифровых голограмм, на участке изображения заднего плана, в зоне нахождения основного изображения – аналогового изображения 3D-объекта, организуется иллюзия глубины сцены. То есть, часть изображения заднего плана визуально плавно переходит из «плоского состояния» в объемное. Таким образом, возникнет оригинальный изобразительный и оптический эффект – визуальное углубление (иллюзия «оптической ниши»), в котором будет «помещено» трехмерное изображение основного объекта (рис. 4).

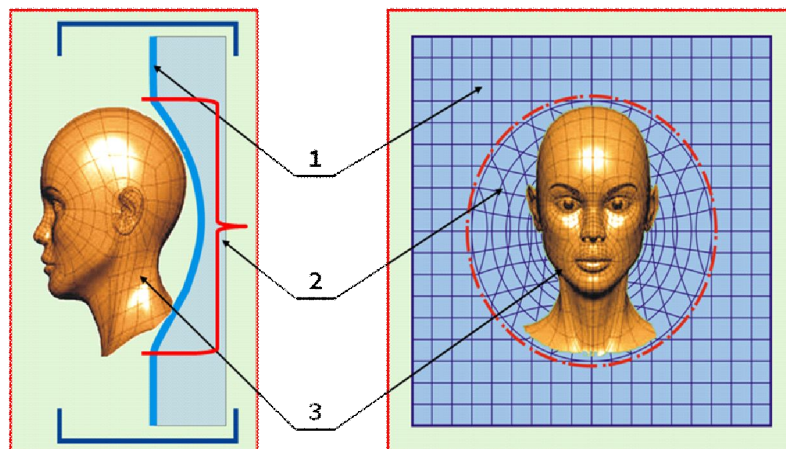


Рис. 4. Условная графическая схема планетарного построения комбинированной голограммы III-го поколения:
 1 – вспомогательное изображение КГ – планарное изображение цифровой голограммы на I плане;
 2 – зона иллюзии глубины сцены за изображением 3D-объекта (иллюзия «оптической ниши»);
 3 – основное изображение КГ – объёмное изображение аналоговой 3D-голограммы (представлено с частичным «выносом»)

Подобное организационное построение КГ, требующее для своей реализации привлечения более сложных и эксклюзивных технологических операций, должно ещё выше поднять её защитный потенциал.

В процессе изготовления КГ III-го поколения потребовалось решить следующие технические и технологические задачи:

I. Обеспечить пространственно-согласованное совмещение изображения, создаваемого аналоговой голограммой, с изображением ранее записанной цифровой голограммы – совмещение по координатам X–Y.

II. Исключить конфликтность восприятия совместных изображений при наложении изображения аналоговой голограммой на изображение цифровой голограммы в зоне её нахождения её тени, а так же ближней к ней периферии.

III. Обеспечить спектральное (частотное) согласование наблюдения изображений при одном и том же их положении относительно глаз наблюдателя и восстанавливающего источника света (рис. 5).

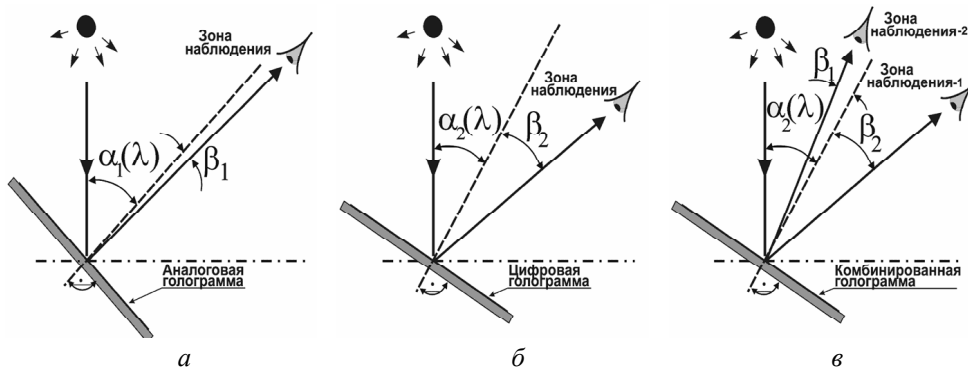


Рис. 5. Условия наблюдения изображения для аналоговой голограммы (а), для цифровой голограммы (б) и для комбинированной голограммы (в) без предварительной спектральной коррекции аналоговой голограммы (наличие одновременно двух зон наблюдения)

При разработке КГ должно быть обеспечено спектральное (частотное) согласование наблюдения изображений, воспроизводимых аналоговой и цифровой голограммами. Проблема заключается в несовпадении зон наблюдения изображений воспроизводимых аналоговой и цифровой голограммами при одном и том же их положении относительно глаз наблюдателя и восстанавливающего источника света. Она является следствием различных технологических принципов заложенных в образование на них периодических структур.

Для ликвидации указанного несоответствия необходимо провести соответствующую спектральную коррекцию условий записи одной из голограмм. За базовые углы наблюдения обычно берутся углы, определяемые условиями наблюдения цифровой голограммы. Под спектральной коррекцией подразумевается запись аналоговой голограммы с теми же пространственными частотами, что и электронная голограмма, для чего проводится перерасчет и коррекция стандартных условий её записи и восстановления. Это обеспечивает равенство углов восстановления β_1 и β_2 на аналоговой и цифровой голограммах и, как следствие, их одновременное «включение» (наблюдение) при одном и том же положении их общего носителя относительно восстанавливающего источника света и глаз наблюдателя.

IV. Для сохранения композиционной целостности всей КГ, и комфортного восприятия объёмного аналогового изображения 3D-объекта относительно изображения цифровой голограммы, как в зоне периферии, так и в зоне «заглубления» изображения заднего плана (зона нахождения «оптической ниши») необходимо стереоскопически согласовать условия наблюдения аналоговой и цифровой голограмм по глубине сцены – совмещение изображений по координате Z.

V. Обеспечить общую визуальную комфортность восприятия всей КГ.

По замыслу разработчиков зона основного изображения на предлагаемой голограмме – изображение «оптической ниши» с расположенным в ней трёхмерным объектом, должна стать полной оптической копией реального аналога, не вызывающего у наблюдателя ощущения, каково-то не соответствия или визуального дискомфорта. Однако в процессе создания КГ III-го поколения разработчики столкнулись с рядом не предвиденных проблем, требующих для своего разрешения более тщательного анализа и поиска путей по их устранению. Вследствие чего

созданный опытный образец голограммы в настоящее время не полностью соответствует поставленным требованиям, и нуждаются в доработке.

Разработчики КГ III-го поколения полагают, что после устранения всех несоответствий внедрение в практику подобной голограммы в качестве голографического защитного знака позволит ещё выше поднять престиж к защитной голографии как надёжного способа в борьбе с поддельной продукцией и документацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яновский А.В. «Комбинированная защитная голограмма на основе планарной цифровой и объемной аналоговой записи изображений». – Одиннадцатая Международная конференция «ГолоЭкспо-2014». Сборник научных трудов. – Голография. Наука и практика. Сочи, 2014.
2. Ячиков А.Н., Куракин С.В. и др. «Способ создания рельефно-фазовой голографической защитной метки». Патент РФ № 2113357. 1998.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. «Оптическая голография». – М.: Мир, 1973.
4. «Оптическая голография». Под редакцией Колфилда Г. – М. Мир, 1982.
5. Рожкова Г.И. Биноклярное зрение. В книге «Руководство по физиологии. Физиология зрения». – М.: Наука, 1992.
6. Валюс Н.А. Стерео: фотография, кино, телевидение. – М.: Искусство, 1986.
7. Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике. Терминологический словарь. – М.: Парадиз, 2003.

NEW TREND IN SECURITY HOLOGRAPHY: HOLOGRAMS COMBINED ON THE BASIS OF ANALOG 3D IMAGE OF THE OBJECT

*Janowski A.V., Kaytukov Ch.B.
(FSUE «STC "Atlas"», Moscow)*

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ ДОТ-МАТРИКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ

Смык А.Ф., Польщикова О.В., Смык А.Ф., Шурыгин А.В.

(ООО «Наноточность», г. Москва)

Системы записи голограмм по схеме проекционного дот-матрикса (рис. 1) прогрессируют быстро в последние годы. Это связано с развитием нового инструментария: лазеров и диодов, пространственных модуляторов света, компьютеров и регистрирующих сред. Оказывает свое влияние и существенное расширение вычислительных возможностей. В результате функционал систем автоматической записи голограмм и их характеристики претерпели значительные изменения.

Прежде всего это относится к переходу от бинарных рельефов с почти прямоугольным профилем проецируемых полос к рельефам с градиентным профилем. Достижимая дифракционная эффективность голограммы при этом снижается с 40,4 до 33,9 % [1], зато появляются новые возможности по формированию различных оптических эффектов и защитных элементов.

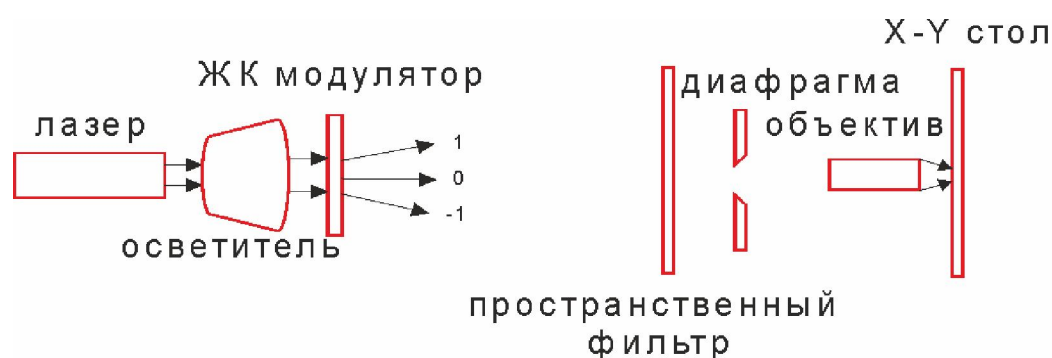


Рис. 1. Схема проекционного дот-матрикса

В зависимости от решаемой задачи в приборе можно реализовывать различные схемы записи. Для записи 2D голограмм, точнее 2D части голограммы, используется интерференция 1 и -1 порядков. Такой режим обозначается SP11. При этом нулевой порядок дифракции блокируется пространственным фильтром, а на модулятор выводятся бинарные полосы. При записи 3D изображений удобнее использовать режим SP01, когда блокируется -1 порядок, а изображение формируется 0 и 1 порядками. Высокая контрастность фоторезиста позволяет получать яркие изображения независимо от соотношения энергий в этих порядках. Для записи литографических изображений или голограмм с низкой несущей частотой используется режим SP0, когда пространственный фильтр убирается из схемы, а диафрагма максимально раскрывается.

Таким образом в одном приборе реализуются три различные оптические схемы, что дает возможность комбинировать на одной пластине в течение одного сеанса записи разнообразные защитные и декоративные элементы.

Следует отметить, что в некоторых системах, особенно с нелазерными источниками, используется только режим SP0. Это, правда, требует качественной оптики и постоянной автоматической фокусировки.

В режиме литографа (SP0) записываются асимметричные профили линз Френеля (рис. 2, *a* и 2, *б*), эшелеттов и скрытников со смещенными порядками.

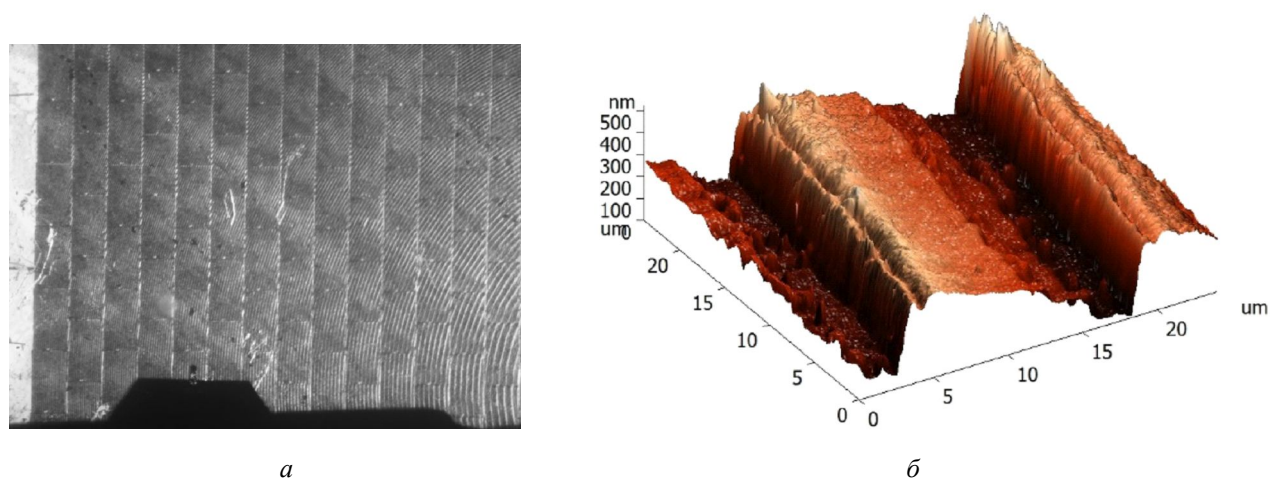


Рис. 2. Фото линзы Френеля (*a*) и ее профиль (*б*)

Возможность формирования градиентных профилей позволяет добиться визуального эффекта различных рельефов (рис. 3). Интересно, что при этом изображение формируется в нулевых порядках и не окрашено радужными цветами.



Рис. 3. Барельефная голограмма

Новые вычислительные возможности привели к новой ситуации с записью 3D голограмм. В системах дот матрикс рассчитываются, как правило, одним из двух методов: стереографическим или геометро-оптическим. Оба метода дают яркие изображения, но разрешение в изображении сильно зависит от количества итераций. Применение многопроцессорных компьютеров позволило рассчитывать квази-цветные голограммы, практически не отличающиеся по реалистичности изображения от аналоговых с количеством итераций в несколько десятков.

Такое расширение возможностей систем дот матрикс открыло простор дизайнеру и голографисту для улучшения эстетических и защитных свойств голограмм. Появилось много интересных эффектов, подходящих для неосведомленной идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография / Пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. – М.: Мир, 1973.

DOT MATRIX ORIGINATION SYSTEMS CURRENT DEVELOPMENT

Polschikova O.V., Smyk A.F., Shurygin A.V.

(ООО «Nanotochnost», Moscow)

Dot matrix projection systems for hologram recording have advanced significantly in recent years due to development of new devices such as lasers, diodes, spatial light modulators and photosensitive materials. Ever-increasing computational capabilities play a large role as well. As a result systems for automatic hologram recording and hologram characteristics have changed a lot.

These changes made it possible to produce gradient profile relief instead of binary thus causing a great variety of the new visual and security features.

REFERENCES

1. *Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H.* Optical Holography. Academic Press, New York, 1971.

ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА МНОГОЦВЕТНЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ С МНОГОРАКУРСНЫМИ ИЗОБРАЖЕНИЯМИ

Лушников Д.С.¹, Маркин В.В.¹, Жердев А.Ю.¹, Одинокоев С.Б.¹, Смирнов А.В.²

(¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; ²ОАО «НПО «Криптен»», г. Дубна)

Многоцветные отражательные голограммы с многокурными изображениями – многоцветные голограммные стереограммы (ГС) возможно использовать в качестве защитных голограмм. Данный вид голограмм идет на смену классической радужной голограмме. Главным достоинством многоцветных ГС является возможность получения полноцветных true color изображений, восстанавливаемых с голограмм данного типа. Помимо этого, в ГС возможно создание эффекта движения многоцветных true color изображений, а также создание объемных изображений.

Изначально была проведена работа по определению угловой и спектральной селективности материалов, используемых при записи ГС – это галогенидосеребряной фотоэмульсии ПФГ – 03Ц и фотополимера на пленочной подложке Bayfol – НХ. Были получены тестовые цветные голограммы на данных фоточувствительных средах. В качестве наиболее подходящей среды для получения мастер – голограмм была выбрана среда ПФГ – 03Ц.

Представленные в данной работе ГС представлены двух типов: однопараллаксные и полнопараллаксные. Под каждый из предложенных типов разработана схема получения ГС.

В качестве первичных экспериментов были получены однопараллаксные одноцветные ГС с эффектом объемности восстановленных с них изображений. Для этого на фоточувствительную среду последовательно были зарегистрированы наборы ракурсов реального и синтезированного объектов. Фотографии восстановленных с полученных однопараллаксных одноцветных ГС изображений приведены на рис. 1.

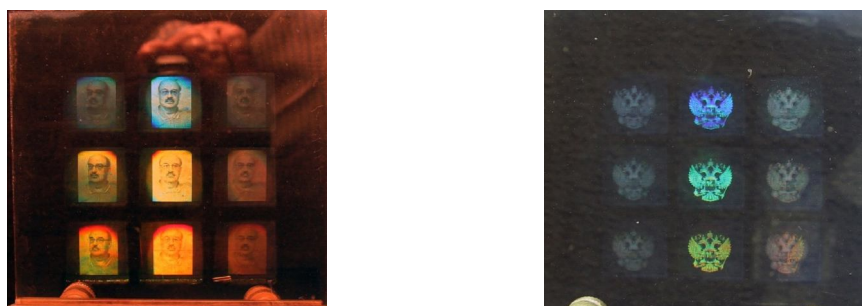


Рис. 1. Фотография однопараллаксных одноцветных мастер – голограмм на ПФГ – 03Ц

Далее были получены однопараллаксные многоцветные ГС, фотографии изображений, восстановленных с них, представлены на рис. 2.

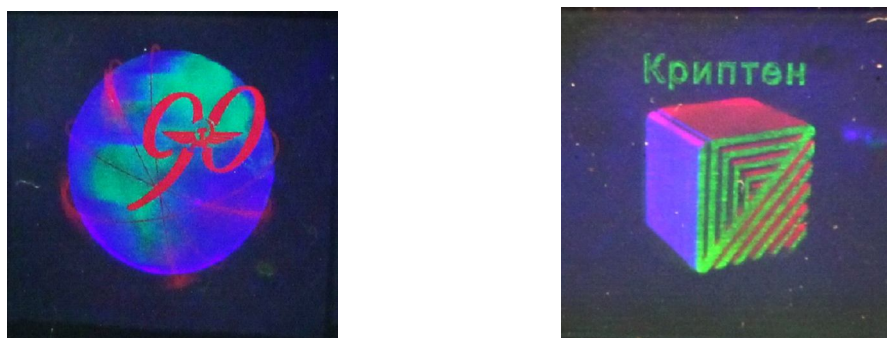


Рис. 2. Фотография однопараллаксных многоцветных мастер – голограмм на ПФГ – 03Ц

Итоговыми ГС, полученными в ходе выполнения работ, стали полнопараллаксные многоцветные ГС. Фотографии изображений, восстановленных с них, представлены на рис. 3. Полнопараллаксные многоцветные ГС были получены на ПФГ – 03Ц с толщинами фоточувствительного слоя 10,5 мкм и 25 мкм.

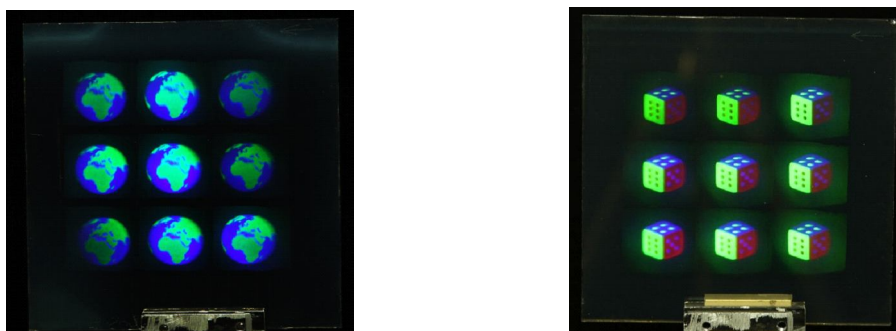


Рис. 3. Фотография мастер – матриц полнопараллаксных многоцветных ГС на ПФГ – 03Ц

По результатам проведенных работ были произведены экспериментальные измерения параметров полученных образцов голограмм. На рис. 4 приведены экспериментально полученные зависимости угловой селективности ГС для двух толщин фоточувствительного слоя.

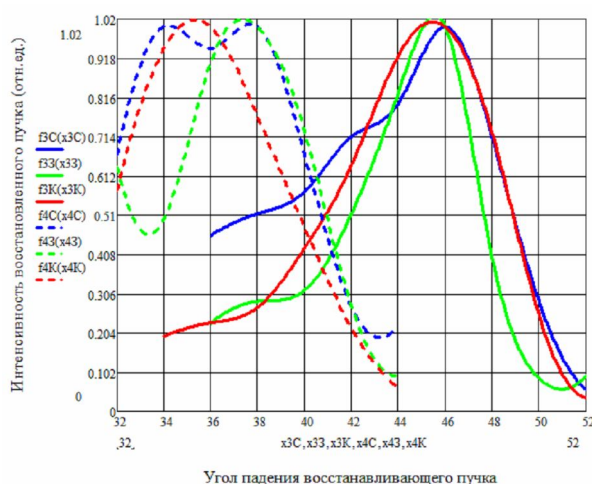


Рис. 4. Графики зависимостей интенсивности восстановленного пучка $f(x)$ от угла падения x восстанавливающего пучка для голограмм, записанных на фоточувствительном слое 25 мкм (сплошные линии) и 10,5 мкм тонкой (пунктирные линии) для длин волн 440, 532 нм и 660 нм

В настоящее время продолжают работы по совершенствованию технологии получения ГС различного типа на различных фоточувствительных носителях по заказу ОАО «НПО «Криптен»».

QUALITY PARAMETERS OF MULTI-COLOR REFLECTIVE SECURITY HOLOGRAMS WITH MULTI-ANGLE IMAGES

Lushnikov D.S.¹, Markin V.V.¹, Zherdev A.Yu.¹, Odinsonov S.B.¹, Smirnov A.V.²

(¹MSTU N.E. Bauman, Moscow; ²«NPO» Krypten, Dubna)

ВЫСОКОАПЕРТУРНАЯ ГОЛОГРАММНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПРИНТЕРА

Жердев А.Ю.¹, Загний Т.С.¹, Одинокоев С.Б.¹, Сагатемян Г.Р.¹, Цыганов И.К.¹,
Смирнов А.В.², Безус Е.А.³

(¹ Московский государственный университета им. Н.Э. Баумана;
² ОАО «НПО «Дубна»; ³ Институт обработки изображений РАН, г. Самара)

В современных оптико-электронных системах получения голограммных стереограмм (голографических принтерах) угол обзора восстанавливаемого голограммной стереограммой изображения 2ω точно определяется удвоенным задним апертурным углом объектива, используемого для получения элементарных голограмм (голопикселей), как показано на рис. 1.

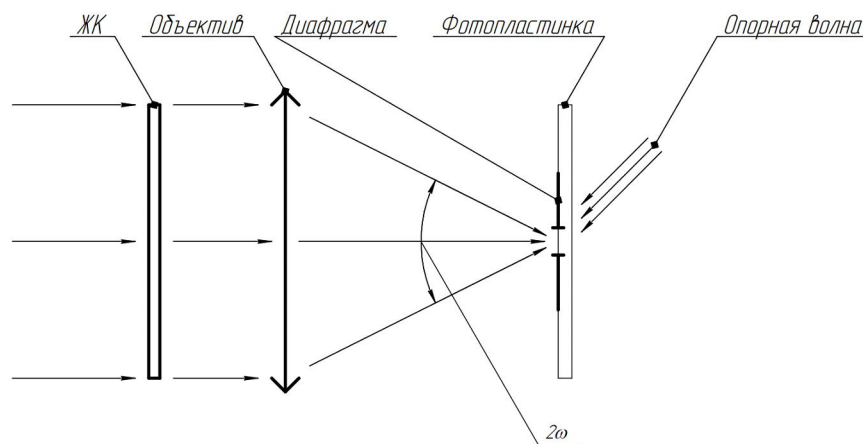


Рис. 1. Схема получения голопикселя с объективом

Однако ввиду принципиальных ограничений рефракционной оптики невозможно получить объектив с задним апертурным углом более, чем $\sigma = 45^\circ$ (а, следовательно, невозможно получить голограммную стереограмму с углом обзора более $2\omega = 90^\circ$). Добиться более высокого угла обзора возможно путём замены рефракционного объектива в оптической системе получения голопикселя на дифракционный оптический элемент (ДОЭ).

В данной работе описывается опыт по созданию составной высоко-апертурной голограммной линзы на основе нескольких голографических линз, зарегистрированных на трёхмерном фоточувствительном материале, и имеющих общую фокальную плоскость.

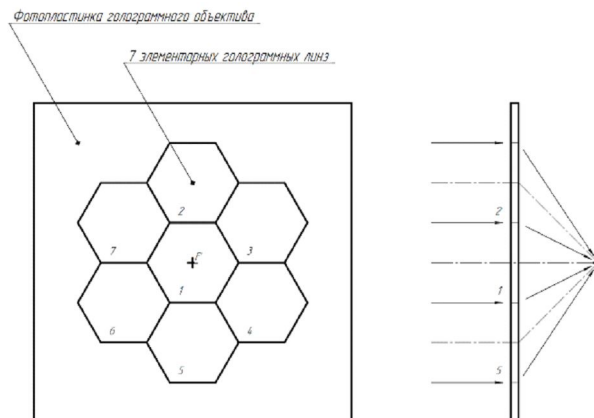


Рис. 2. Схема высоко-апертурной голограммной линзы

В ходе работы была получена голограммная линза, состоящая из четырёх элементарных голографических линз с относительным отверстием 1:1, что позволило добиться эффективно-го заднего апертурного угла $\sigma \approx 60^\circ$ (эффективное относительное отверстие до 0,3:1). Это сделало возможным получение голограммных стереограмм с углом обзора до $2\omega \approx 120^\circ$.

Исследовано распределение дифракционной эффективности и качество формируемого составной голограммной линзой изображения в голограммной стереограмме.

HIGH-APERTURE HOLOGRAM HOLOGRAPHIC LENS FOR THE PRINTER

***Zherdev A.¹, Zagny T.S.¹, Odinkov S.B.¹, Saghatelian G.R.¹, Tsyganov I.K.¹,
Smirnov A.V.², Bezus E.A.³***

(¹MSTU N.E. Bauman, Moscow; ²«NPO» Krypten, Dubna;

³The Institute of Imaging Sciences, Samara)

Short-focus holographic lens is a holographic optical element consisting of several zones with holographic lens. Such approach allows us to obtain a lens with aperture $f/0.3$ that can be used as condenser in non-imaging optical systems. Short-focus holographic lens can be used in holographic printers for increasing the angle of view of holographic stereograms.

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ

Ткаченко В.В., Борискевич А.А., Ероховец В.К.

(Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси), г. Минск, Республика Беларусь)

Голограммы Френеля характеризуются рядом свойств, определяющих потенциальные возможности их использования в защите информации: чувствительность к изменению ключевых параметров (расстояние дифракции, виртуальная длина волны света), устойчивость к площадным повреждениям, гибкость настройки параметров проецируемого голографического изображения с внесением в голограмму скрытых изображений (цифровых водяных знаков) и различных визуальных эффектов.

Экспериментально показано [1, 2], что при использовании только амплитудной компоненты голограммы Френеля изображение не может быть восстановлено, а значимую информацию несет фазовая компонента. Для повышения эффективности использования голограмм Френеля предложено цифровое преобразование комплексного представления голограммы Френеля, в котором сохраняется ее фазовая компонента, а амплитудная компонента представлена в бинарном виде. В работе анализируются свойства алгоритмов бинаризации и их влияние на качество восстанавливаемых изображений.

Бинарное преобразование реализуется сканированием амплитудного растра по некоторой траектории с одновременной локальной пороговой фильтрацией по значению амплитуды. Потери качества изображения, связанные с изменением уровней квантования при бинаризации, компенсируются рассеянием ошибки квантования в пределах некоторой окрестности с помощью фильтра. Параметры рассеивающего фильтра задаются маской, размеры и форма которой выбираются с учетом особенностей зрительного восприятия и типа сканирования голограммы.

Для распределения ошибки квантования по соседним пикселям окрестности применяются различные маски (рис. 1), отличающиеся количеством и значениями весовых коэффициентов α_k , которые должны удовлетворять соотношению $\sum_k \alpha_k = 1$.

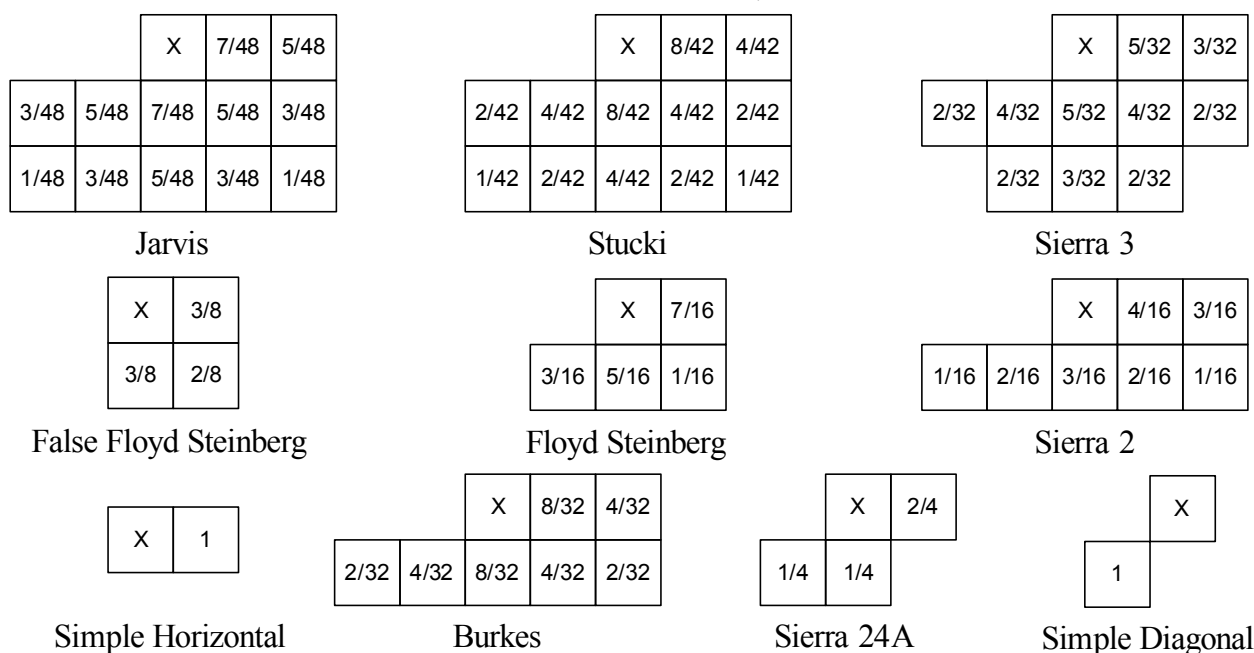


Рис. 1. Маски для рассеяния ошибки квантования при бинаризации

Локальное значение амплитуды (0 или 1) на каждом шаге сканирования вычисляется для суммы исходного значения амплитуды и значений ошибок для соответствующей позиции, полученных на предыдущем шаге. При оценке влияния способа сканирования на качество восстановления фазовой голограммы Френеля используются варианты построчной однонаправленной развертки и развертки во встречных направлениях (рис. 2) или их комбинации.



Рис. 2. Способы сканирования: а – в одном направлении; б – в двух направлениях (серпантин)

С учетом ромбовидной разрешающей способности зрительной системы по полю зрения предложены четыре маски фильтра рассеяния ошибки, позволяющие распределять ошибки квантования по диагональным соседним пикселям (рис. 3).

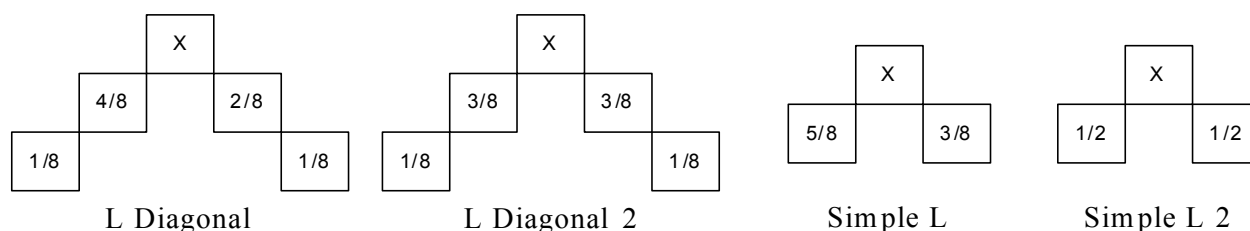


Рис. 3. Перцептуальные маски для рассеяния ошибки квантования с учетом анизотропной пространственно-частотной характеристики зрительной системы

Установлено, что лучшее качество восстановленного изображения, близкое к оригиналу (PSNR>32 дБ), обеспечивается для фазовой голограммы Френеля, полученной при бинаризации ее исходной амплитудной компоненты с использованием двунаправленного сканирования и перцептуальных масок рассеяния ошибок квантования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борискевич, А.А.* Защитные элементы на основе цифровых голограмм / А.А.Борискевич, В.К. Ероховец, В.В. Ткаченко // Голография: теоретические и прикладные вопросы. Материалы XXVIII Школа-симпозиум по голографии и когерентной оптике. Нижний Новгород, 22-26 августа 2013. – Н. Новгород, Изд-во Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013. – С. 41-43.
2. *Борискевич, А.А.* Цифровые модели квантованных голограмм Фурье и Френеля / А.А. Борискевич, В.К. Ероховец, В.В. Ткаченко // Голография. Наука и практика: 10-я Международная конференция «ГОЛОЭКСПО-2013», Москва, 17-18 сентября 2013 г. – М., 2013.

DIGITAL PHASE FRESNEL HOLOGRAMS SYNTHESIS

Tkachenko V.V., Boryskevych A.A., Erokhovets V.K.

(United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)

To improve the efficiency of the use of Fresnel holograms is proposed digital conversion of Fresnel hologram complex representation, which stores its phase component and involves the amplitude component in binary form. We analyzed the properties of binarization algorithms and their impact on the quality of image reconstruction.

The binary conversion is implemented by scanning the amplitude component raster according to some trajectory with simultaneous local threshold-filtering of amplitude value. Loss of image quality associated with changes in quantization levels offset by scattering of quantization error within some neighborhood. The scattering filter parameters are given by mask. The size and shape of mask are selected with consideration of the peculiarities of visual perception and the type of scanning of the hologram.

Four masks for scattering filter are proposed. This masks allow to distribute quantization error on the diagonal neighbor pixels according diamond resolving ability of the visual system across the field of view.

Found that the best quality of reconstructed image similar to the original (PSNR>32 dB), is provided to a phase Fresnel hologram obtained by binarization of its original amplitude components using duplex scanning and perceptual masks scattering quantization errors.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОНЦЕНТРАТОР ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Ткаченко В.В., Конойко А.И., Залесский В.Б., Пилипович В.А.

*(Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси),
г. Минск, Республика Беларусь)*

Применение концентраторов солнечного излучения позволяет во много раз уменьшить требуемую для получения заданной электрической мощности площадь полупроводниковых фотоэлементов, повысить их устойчивость к воздействию внешних факторов. При этом возникает необходимость оптимального согласования параметров концентраторов и фотопреобразователей, у которых сильно выражена селективность по отношению к спектру падающего излучения.

Представляет интерес спектральная селекция и концентрация солнечного излучения с помощью объемных голографических решеток в условиях дифракции Брэгга, при которой дифракционная эффективность (ДЭ) близка к единице. Оптическая разность хода лучей в толстослойных голограммах достигается изменением показателя преломления среды и изменением толщины. Амплитуда изменения показателя преломления среды для голограмм первого вида может составлять величину порядка $\Delta n_1 = 0,01$, а для второго вида (рельефных) – $\Delta n_2 = 0,5$. Показано, что первые из-за малой Δn_1 и большой требуемой толщины слоя обладают высокой пространственной селективностью и критичны к своей ориентации относительно источника излучения.

Рельефные голограммы, ДЭ которых менее чувствительна к изменению угла падения излучения, представляют больший практический интерес и рассматриваются как цветоселектирующие слои из голографических решеток на совмещенных плоскопараллельных пластинах. Солнечное излучение выделенных спектров излучения, испытывая полное внутреннее отражение внутри пластин, через торцевые их части попадает на фоточувствительные элементы соответствующих спектральных диапазонов.

Повышение суммарной эффективности преобразования солнечного излучения с применением такого концентратора на решетках с разными периодами, эффективно работающими в относительно узких спектральных диапазонах, достигается перекрытием их спектральных диапазонов путем сдвига спектральных максимумов ДЭ отдельных голографических решеток за счет изменения угла θ между направлением падающего излучения и рассеивающими слоями.

Для трех голографических решеток с разными периодами зависимости величины граничных длин волн излучения, передаваемого в пластины, от угла $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ падения световой волны соответственно изображены на рис. 1.

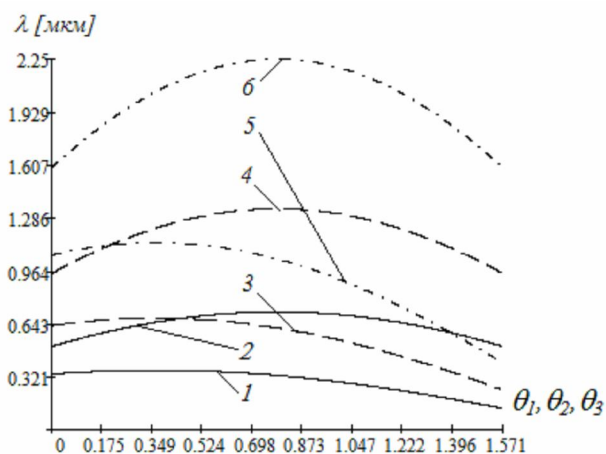


Рис. 1. Изменения диапазона длин волн излучения (λ_{\min} и λ_{\max}), передаваемого в плоскопараллельную пластину, от угла падения световой волны на голографические решетки с разным периодом d :
1, 2 – $d_1 = 0,337$ мкм; 3, 4 – $d_2 = 0,632$ мкм;
5, 6 – $d_3 = 1,06$ мкм

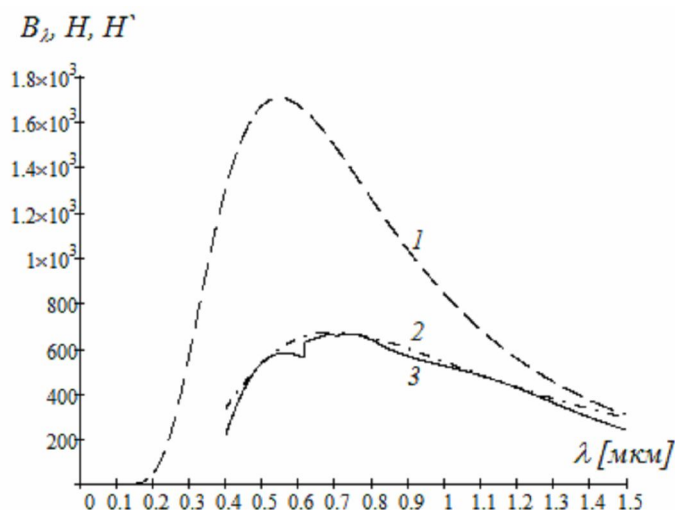


Рис. 2. Спектральные зависимости величины энергетической яркости солнечного излучения B_λ (1); эффективности H преобразования солнечного излучения самими элементами моно-Si и германия (2); суммарной эффективности H' преобразования солнечного излучения с разделением его спектра на трех голографических решетках (3)

Расчеты показывают, что суммарная эффективность преобразования солнечного излучения H' в диапазоне длин волн (400÷1500 нм) составляет 95,6 % от эффективности H преобразования самих элементов и 37,8 % от величины падающего светового потока в спектральном диапазоне от 0 до 10 мкм. Предложенный и исследованный метод концентрации солнечного излучения за счет преобразования его пространственных и спектральных характеристик на фазовых объемных голограммах позволяет существенно повысить эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую, так как на каждый фотопреобразователь будет поступать излучение, соответствующее его максимальной спектральной чувствительности.

HOLOGRAPHIC CONCENTRATOR FOR SOLAR CELL

Konojko A.I.¹, Zalessky V.B.¹, Pilipovich V.A., Tkachenko V.V.²

(¹The B.I.Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus;

²United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)

Presents the results of calculation of characteristics of a flat holographic solar concentrators. Shows the spectral dependence of the total efficiency of solar radiation conversion by mono-Si and Ge elements using a hub with three holographic gratings.

Calculations show that the total efficiency (H') of the solar radiation conversion in the range of wavelengths from 400 to 1500 nm is 95.6 per cent of the conversion efficiency (H) of elements and 37.8 per cent of the magnitude of the incident light flux in the spectral range from 0 to 10 mm.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОДАВЛЕНИЯ СПЕКЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ СО СМЕКТИЧЕСКИМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЖК

Андреев А.Л.¹, Андреева Т.Б.¹, Компанец И.Н.^{1,2}, Заляпин Н.В.²

(¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН;

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

Аннотация:

Авторами разрабатывается оригинальный метод подавления спекл-шума в формируемых лазерным пучком изображениях с помощью компактного деспеклера на основе электрооптической ячейки со смектическим сегнетоэлектрическим жидким кристаллом (СЖК), осуществляющей пространственно-неоднородную фазовую модуляцию света. Сравняются механизмы разрушения фазовых соотношений в лазерном пучке, проходящем через ячейку, при индуцировании в ней электрическим полем мелкомасштабных случайно распределенных градиентов показателя преломления в слое геликоидального (спирального) и негеликоидального СЖК. Обсуждаются перспективы практического использования метода в лазерных отображающих устройствах.

Ключевые слова: интерференция, спеклы, электрооптическая ячейка, смектический кристалл, фазовая модуляция света, рассеяние света.

Введение

В работах [1, 2] предложен метод пространственно-неоднородной модуляции фазы света с использованием простой электрооптической ячейки, заполненной жидким кристаллом (ЖК), а именно, сегнетоэлектрическим ЖК смектического типа (СЖК) со спиральной (геликоидальной) структурой. К ячейке одновременно на низкой частоте (450 Гц) и высокой частоте (3500 Гц) прилагалось знакопеременное электрическое поле, которое вызывало пространственные деформации геликоида и вело к образованию в слое ЖК мелкомасштабных пространственно-неоднородных и быстро изменяемых во времени структур со случайным распределением градиентов показателя преломления, обеспечивающих пространственно-неоднородную по апертуре ячейки фазовую модуляцию проходящего света с высоким пространственным разрешением (порядка шага спирали, то есть долей микрометра).

В работах [3-5] описан оптический модулятор-деспеклер на основе электрооптической ячейки с негеликоидальным сегнетоэлектрическим ЖК. Эффект пространственно-неоднородной по апертуре фазовой модуляции света в слое СЖК достигнут одновременным воздействием высокочастотного (до 10 кГц) и низкочастотного (до 1000 Гц) импульсного питающего напряжения, т.е. интервал частот модуляции света при напряженности электрического поля порядка 2 В/мкм по сравнению с [1] возрос вдвое, что расширяет диапазон возможных применений модулятора. Его главными достоинствами явились отсутствие искажений в спектральном составе промодулируемого светового излучения и отсутствие светорассеяния при выключении электрического поля. Кроме того, одинаковая форма импульсов низкочастотного и высокочастотного напряжения (меандр) позволила упростить электронную схему управления.

Ниже обсуждаются механизм и параметры модуляции светорассеяния в новых негеликоидальных СЖК-материалах и перспективы практического использования метода в лазерных отображающих устройствах.

Механизм модуляции светорассеяния в негеликоидальном СЖК

В наших прошлых работах [6, 7], исследовался электро-оптический отклик при динамическом рассеянии света, наблюдаемом в тестовой ячейке спирального СЖК. Рассеиваю-

щая текстура, состоящая из микро-доменов появлялась во время нелинейного процесса переориентации молекул директора FLC в переменном электрическом поле E . Рассеяние характеризовалось достаточно высокой скоростью (время его включения и выключения не превышало 150 мкс в поле $E = 5 \text{ В/}\mu\text{м}$), высокой интенсивностью рассеяния света (может быть определена контрастным отношением, которое превышало 100: 1), а также бистабильным режимом (двумя устойчивыми состояниями), обусловленным совместным влиянием амплитуды и длительности прилагаемых электрических импульсов. Однако стабильность каждого оптического состояния (рассеянного или ставшего прозрачным после отключения электрического поля) была довольно слабой, и оно сохранялось в течение всего нескольких миллисекунд [7].

Авторы рассматривают здесь новый тип светорассеивающих материалов и их электрооптические характеристики. Эти материалы – специально разработанные негеликоидальные СЖК с величиной спонтанной поляризации P_s менее 50 нКл/см^2 . Спираль была полностью компенсирована (подавлена) за счет взаимодействия хиральных примесей, обладающих противоположным знаком оптической активности.

В ячейке с негеликоидальным СЖК в отсутствие электрического поля, при определенном соотношении материальных параметров ($0,3 < \gamma_\phi < 1,0$ Пуаз, $P_s \leq 50 \text{ нКл/см}^2$, а модуль упругости, определяющий деформацию вдоль смектических слоев, $K = (1 \div 3) \cdot 10^{-12}$ Ньютон) возникают периодические деформации смектических слоев СЖК, приводящие к периодическим изменениям положения оптической оси вдоль смектических слоёв [8]. Переменное электрическое поле, приложенное вдоль смектических слоев, взаимодействуя со спонтанной поляризацией, изменяет распределение директора в каждом смектическом слое. Развитие этого процесса, обусловленное переходом к максвелловскому механизму диссипации энергии, вызывает появление солитона, который представляет собой волновой пакет с локализованной в нем периодической волной (цуг солитонов).

Возникновение волн стационарного профиля приводит к образованию структуры переходных доменов – спонтанно упорядоченных областей, на границах которых происходит рассеяние света. Движение солитонов переориентирует директор во всем объеме СЖК. В этом случае, если плоскость поляризации падающего света лежит вдоль направления директора СЖК (вдоль главной оптической оси), то светопропускание электрооптической ячейки максимально.

Инверсия знака электрического поля (полярности импульсов управляющего напряжения) вновь индуцирует образование солитонных волн, что вызывает появление градиентов показателя преломления вдоль смектических слоев и сопровождается интенсивным рассеянием света. Кроме того, описанный выше процесс рассеяния позволяет работать в бистабильном режиме, когда переключение электрооптического модулятора из пропускающего в рассеивающее состояние и обратно осуществляется при изменении полярности импульса управляющего напряжения. Причем оба оптических состояния сохраняются до прихода импульса обратной полярности или в течение нескольких десятков секунд после выключения поля.

В работе использовался негеликоидальный СЖК со следующими материальными параметрами, удовлетворяющими вышеуказанному условию: спонтанная поляризация $P_s = 40 \text{ нКл/см}^2$, коэффициент вращательной вязкости $\gamma_\phi = 0,7$ Пуаз, угол наклона молекул в смектических слоях $\Theta_0 = 23^\circ$ (при температуре 20°C), температурный интервал существования сегнетоэлектрической (хиральной смектической C^*) фазы от 2 до 70°C .

Теоретическое обоснование

Молекулы СЖК в смектических слоях, исходно наклоненные на угол Θ_0 относительно нормали к слою в данной точке, в электрическом поле E (направлено вдоль координаты y) дополнительно отклоняются на некоторый угол Ψ относительно оси z (рис. 1). Вследствие этого,

изменяется проекция директора на плоскость xy . Толщина изогнутого смектического слоя в проекции на ось z :

$$l = l_0 \cos\Theta_0 / \cos\Psi. \quad (1)$$

Объемную плотность свободной энергии, связанную с такой деформацией, можно записать как [9]:

$$F = \frac{1}{2} K \left(\frac{d\Psi}{dy} \right)^2 + \frac{1}{2} M \left(\frac{l-l_0}{l_0} \right)^2, \quad (2)$$

где K – коэффициент упругости, описывающий деформацию директора по углу Ψ , M – энергия изгиба смектических слоев. С учетом малости углов Ψ и Θ_0 ($\Psi, \Theta_0 \ll 1$) относительное изменение толщины смектического слоя $(l-l_0)/l_0 = (\Psi^2 - \Theta_0^2)/2$.

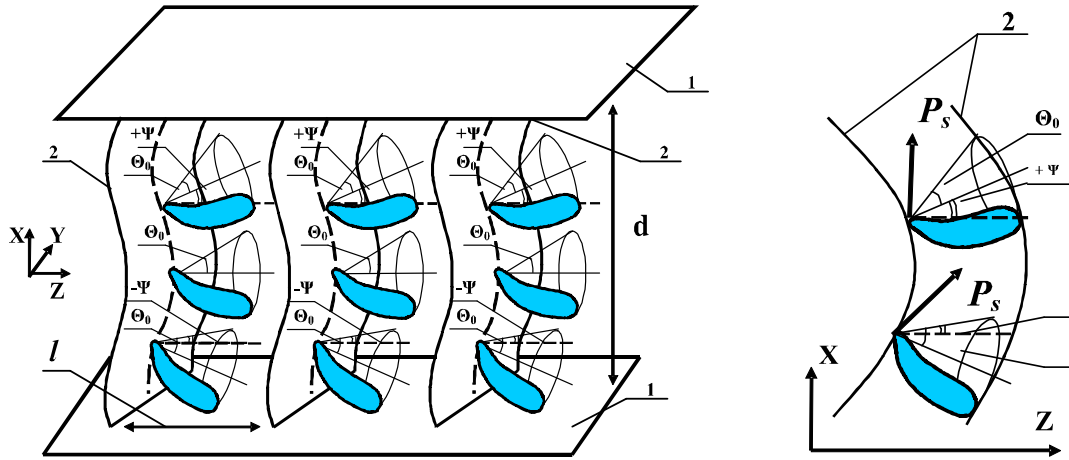


Рис. 1. Деформация смектических слоев в негеликоидальном СЖК:

Θ_0 – угол наклона молекул в смектических слоях; Ψ – угол наклона смектического слоя; P_s – вектор спонтанной поляризации; d – толщина электрооптической ячейки; l – толщина смектического слоя; 1 – ограничивающие поверхности; 2 – смектические слои. Планарная ориентация

Граничные условия для уравнения (2) задаются следующим образом:

$$\psi(y=0) = \Theta_0, \quad d\psi/dy(y=d) = 0. \quad (3)$$

Минимизируя функционал (2), приходим к уравнению, которое описывает распределение угла Ψ вдоль координаты y ($0 \leq y \leq d$, d – толщина электрооптической ячейки):

$$\frac{d^2\Psi}{dy^2} + \frac{M\Theta_0^2 d^2}{2K} \Psi - \frac{Md^2}{2K} \Psi^3 = 0 \quad \text{и } y' = y/d, \quad 0 \leq y' \leq 1. \quad (4)$$

Решая уравнение (4) через эллиптический синус Якоби и используя метод Ван дер Поля [10], с учетом граничных условий (3), получаем приближенное решение в следующем виде:

$$\Psi = \Theta_0 \cos \left(\frac{5}{8} \Theta_0 \sqrt{\frac{M}{2K}} y \right). \quad (5)$$

Это решение описывает структуру со смектическими слоями, деформированными в направлении, ортогональном подложкам (координата y) с периодом порядка 4 мкм, что согласуется с экспериментальными данными [8].

Переориентация директора СЖК за счет взаимодействия переменного электрического поля E со спонтанной поляризацией P_s может происходить как при изменения азимутального угла ориентации директора ϕ на 180° , когда директор переориентируется по образующим конуса с ра-

створом $2\Theta_0$, так и при изменении распределения угла Ψ , отражающего деформацию смектических слоев. В первом случае диссипативным коэффициентом является вращательная вязкость γ_φ , а во втором – вязкость при деформации сдвига γ_ψ .

Объемную плотность свободной энергии электростатического взаимодействия, можно записать как

$$\frac{1}{2} P_s E \cos \varphi_0 \left(\frac{l-l_0}{l_0} \right)^2, \quad (6)$$

где φ_0 – начальный азимутальный угол ориентации директора.

Минимизируя выражение для свободной энергии (2) с учетом (6), получаем уравнение баланса моментов, которое описывает изменение угла Ψ под действием поля E . Решая его в тех же граничных условиях и учитывая, что функция ψ зависит не только от координаты, но и от времени, приходим к уравнению, решением которого является двухпараметрический солитон. Один из его параметров – скорость движения центра V , другой – его собственная частота Ω в системе отсчета, движущейся с солитоном. С учетом нормировки и граничных условий решение уравнения имеет вид:

$$\tilde{\varphi}_0 = \pm \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \frac{\sqrt{\beta + k^2 - w}}{\operatorname{ch}(\sqrt{\beta + k^2 - w}(y' - Vt'))} \exp(i(ky' - wt' + C)), \quad (7)$$

где $k = V/2$, C – константа, определяющая начальную фазу; $\xi > 0$ – константа, $\beta = \alpha\Theta_0^2 - \xi^2$, $\alpha = d^2(P_s E \cos \varphi_0 - M)/2K$, $t'' = t'/2\xi$. Решение (7) можно рассматривать как периодическую волну с волновым числом k и частотой w , локализованную в солитоне и являющуюся его «заполнением» – цуг солитонов. График $\operatorname{Re} \tilde{\Psi}_0$ имеет вид волнового пакета (рис. 2).

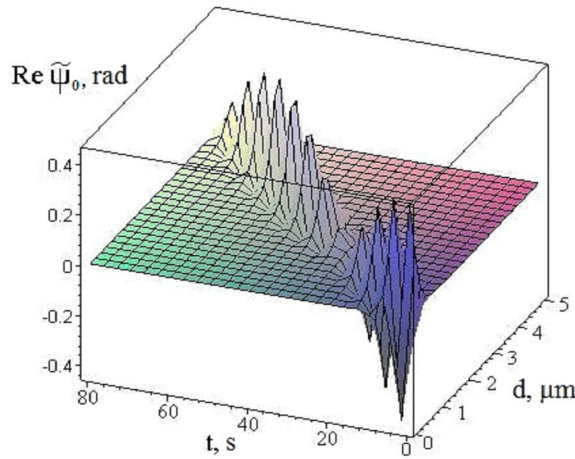


Рис. 2. Графическое решение уравнения (7)

Движение солитонов переориентирует директор во всем объеме СЖК с характерным временем переориентации:

$$\tau_c = \frac{\gamma_\psi}{\Theta_0^2 (P_s E \cos \varphi_0 + M) - \frac{2K}{d^2}}. \quad (8)$$

При $\varphi_0 = 30^\circ$, $P_s = 50 \text{ nC/sm}^2$, $M = 4 \cdot 10^3 \text{ erg/sm}^3$, $K = 5 \cdot 10^{-12} \text{ N}$, $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $E = 2 \text{ V/}\mu\text{m}$, $\Theta_0 = 23^\circ$ и $\gamma_\varphi = 0,2$ Пуаз время переориентации директора $\tau_c \approx 100 \text{ мкс}$.

Экспериментальные результаты

Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии сопровождается сильной частотной зависимостью времени $\tau_{0,1-0,9}$ (рис. 3, кривая 1). Первоначальное увеличение времени электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$ связано с одновременным присутствием обоих диссипативных коэффициентов γ_ϕ и γ_ψ . Причем, время $\tau_{0,1-0,9}$ возрастает не более чем на 25 %, что позволяет предположить, что величина сдвиговой вязкости $\gamma_{ш}$ в данном случае не превышает 0,2 Пуаз (для используемого СЖК $\gamma_\phi = 0,7$ Пуаз). В свою очередь, преобладание сдвиговой вязкости приводит к уменьшению времени $\tau_{0,1-0,9}$ в несколько раз. При дальнейшем увеличении частоты, когда происходит переход к солитонной моде, и время $\tau_{0,1-0,9}$ определяется скоростью движения солитонных волн, частотная зависимость времени электрооптического отклика практически отсутствует.

Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии сопровождается также уменьшением показателя двулучепреломления СЖК Δn (кривая 2). Максимальное изменение Δn (примерно в 1,5 раза) происходит при переходе к солитонной моде.

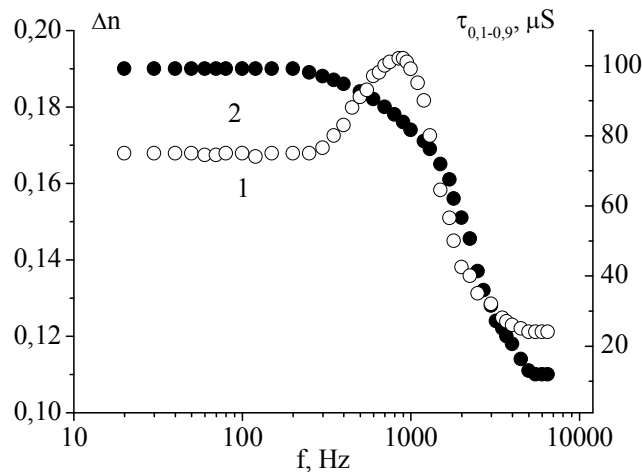


Рис. 3. Частотные зависимости времени электрооптического отклика (1) и показателя двулучепреломления Δn (2). Толщина электрооптической ячейки $d = 13$ мкм. Напряженность электрического поля $E = 6$ В/мкм

Светорассеяние в негеликоидальных СЖК связано с пространственной неоднородностью оптической анизотропии: рассеяние происходит на границах спонтанно упорядоченных областей, которые формируются в СЖК при возникновении волн стационарного профиля – солитонов. Это приводит к образованию структуры переходных доменов (рассеивающих центров), когда вдоль направления смектических слоев появляется неоднородное распределение электрической поляризации. Действие высокочастотного электрического поля увеличивает длину доменных границ и формирует достаточно регулярную структуру циркулярных доменов, что, в свою очередь, приводит к росту плотности рассеивающих центров. Изменение направления электрического поля индуцирует образование новой доменной структуры, что вызывает появление градиентов показателя преломления вдоль смектических слоев, и этот процесс снова сопровождается интенсивным рассеянием света.

Время включения и выключения процесса рассеяния (время электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$) практически одинаково и не превышает длительность импульса, включающего процесс рассеяния (рис. 4). В случае, если диссипативный коэффициент – вращательная вязкость γ_ϕ ,

то в слабых полях время $\tau_{0,1-0,9} \sim \gamma_{\psi} / P_S E$ при частоте изменения электрического поля $f \leq 200$ Гц (рис. 4, кривая 1). Преобладание сдвиговой вязкости γ_{ψ} при частоте изменения поля свыше 1 кГц приводит к уменьшению времени $\tau_{0,1-0,9}$ в несколько раз (рис. 4, кривая 2).

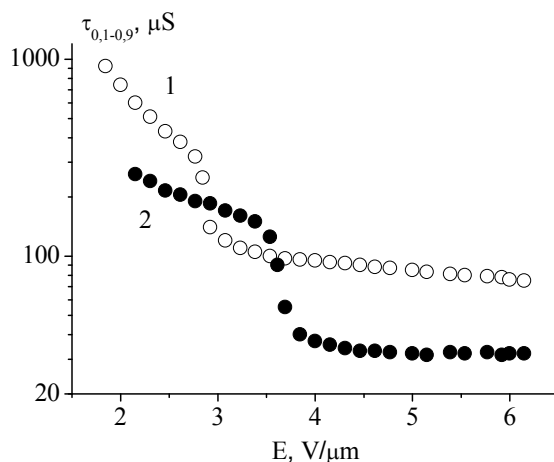


Рис. 4. Полевые зависимости времени электрооптического отклика (время включения и выключения процесса рассеяния) для электрооптической ячейки толщиной 13 мкм. Частота управляющего напряжения 200 Гц (кривая 1) и 3 кГц (кривая 2).

При определенном соотношении между амплитудой и длительностью биполярных импульсов управляющего напряжения, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК, процесс рассеяния имеет бистабильный характер. Это означает, что оба оптических состояния структуры как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния, сохраняются в течение нескольких десятков секунд после выключения электрического поля или до прихода импульса противоположной полярности (рис. 5).

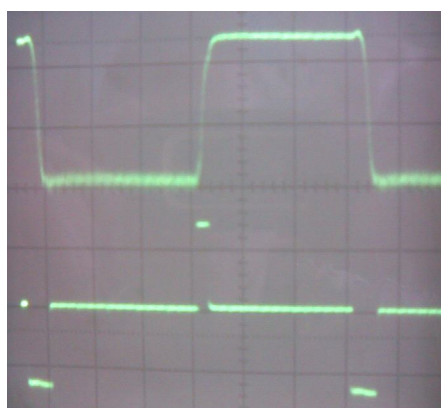


Рис. 5. Осциллограммы управляющего напряжения (внизу) и электрооптического отклика (вверху) при бистабильном режиме переключения. Управляющее напряжение: биполярные импульсы с амплитудой ± 35 В. Верхний уровень электрооптического отклика – рассеивающее состояние, нижний – пропускающее. Масштаб по оси x: 1 деление – 500 мкс. Толщина ячейки 13 мкм.

Переключение импульсами напряжения разной длительности обеспечивает работу электрооптической ячейки в бистабильном режиме со светопропусканием порядка 80 % и контрастным отношением свыше 200:1. Изменение скважности между импульсами управляющего напряжения (при сохранении длительности) приводит к изменению соотношения между временем существования обоих оптических состояний.

Заключение

Развивается метод пространственно- неоднородной модуляции фазы света с использованием простой электрооптической ячейки, заполненной сегнетоэлектрическим ЖК смектического типа (СЖК) со спиральной (геликоидальной) или бесспиральной структурой. Рассматривается новый тип светорассеивающих негеликоидальных СЖК и их электрооптические характеристики.

Теоретически обосновывается периодическая деформация смектических слоёв в отсутствие электрического поля и солитонный механизм переориентации директора СЖК в электрическом поле при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии. Экспериментально изучены частотные зависимости времени электрооптического отклика и показателя двулучепреломления и полевые зависимости времени электрооптического отклика.

Показано, что при определенном соотношении между амплитудой и длительностью биполярных импульсов управляющего напряжения, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК, процесс рассеяния имеет бистабильный характер, причём оба оптических состояния (и с максимальным светопропусканием, и с максимальной светорассеянием) сохраняются в течение нескольких десятков секунд после выключения электрического поля или до прихода импульса противоположной полярности.

Последние эксперименты также показали, что при определённых условиях, а именно, характеристиках СЖК и СЖК-ячейки и параметрах импульсного режима, пространственно-неоднородную фазовую модуляцию проходящего через СЖК-ячейку лазерного излучения, необходимую для разрушения его способности к интерференции и образованию спеклов, возможно осуществлять на одной частоте. Но пока эти условия требуют дополнительного исследования.

Авторы работы благодарят Президиум РАН за поддержку по Программе фундаментальных исследований и Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку работы по гранту 14-07-00185а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Минченко М.В., Пожидаяев Е.П. Квантовая электроника. – Т. 38, № 12. – С. 1166-1170 (2008).
2. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Minchenko M.V., Pozhidaev E.P. Speckle-noise suppression due to a single ferroelectric liquid-crystal cell. Journal of the SID. – Vol.17, #10. – P. 801-807 (2009).
3. Andreev A.L., Andreeva T.B., Компанец И.Н. Speckle reduction due to using the electro-optical cell with helix-free FLC. SID'14 Symposium Digest (San Diego). – Vol. 45. – P. 411-414 (2014).
4. Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Заляпин Н.В. Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического ЖК. Квантовая электроника. – Т. 44, № 12. – С. 1136-1140 (2014).
5. Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Заляпин Н.В. Подавление спеклов с помощью ячейки с негеликоидальным СЖК. Сб. трудов 11-й Международной конференции «Голо-Экспо–2014» (Сочи). «Голография. Наука и практика». – Изд-во ООО «МНГС». – С. 92-101 (2014).
6. Andreev A.L., Bobylev Y.P., Gubasaryan N.A., Kompanets I.N., Pozhidaev E.P., Fedosenkova T.B., Shoshin V.M., Shumkina Ju.P. Electrically Controlled Light Scattering in Ferroelectric Liquid Crystals, J. of Optical Technology, 72, No. 9. – P. 702-707 (2005).
7. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Bobylev Y.P., Shoshin V.M., Minchenko M.V. Electrically Controlled Light Scattering in Helix Ferroelectric Liquid Crystals. J. of Optical Technology, т. 77, No.12. – P. 776-783.

8. Андреев А., Компанец И. Жидкокристаллические дисплеи: перспективы развития (часть 1). Электроника: Наука, Технология, Бизнес, № 6. – С. 72-88 (2012).

9. Федосенкова Т.Б., Андреев А.Л., Пожидаев Е.П., Компанец И.Н. Управляемое внешним электрическим полем двулучепреломление в негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах. Краткие сообщения по физике, № 3. – С. 45-52 (2002).

10. Косевич А.М., Ковалев А.С. Введение в нелинейную физическую механику. Наукова Думка, Киев (1988).

PROSPECTS FOR THE SUPPRESSION OF SPECKLES BY USING ELECTRO-OPTICAL CELL WITH SMECTIC FERROELECTRIC LC

Andreev A.L.¹, Andreeva T.B.¹, Kompanets I.N.^{1,2}, Zalyapin N.V.²

(¹P.N. Lebedev Physical Institute of RAS;

²National Research Nuclear University «МЕРФИ»)

In first works the method for spatially inhomogeneous light phase modulation was proposed with using a simple electro-optical cell filled with liquid crystal (LC), namely, ferroelectric LC of smectic type (FLC) with a helix structure. To this cell simultaneously at a low frequency (450 Hz) and high frequency (3500 Hz) the alternating electric field was applied. It caused spatial deformations of a helix and resulted in the formation in FLC layer the small-scale spatially inhomogeneous and rapidly changed (in time) patterns with a random distribution of the refractive index gradient, providing a spatially non-uniform (across a cell aperture) phase modulation of transmitted light with a high spatial resolution (on the order of the helical pitch, that is, parts of a micrometer).

Later the optical modulator – despekler based on electro-optical cell with helix-free ferroelectric LC was described. The effect of spatially inhomogeneous (over a cell aperture) phase modulation of light in FLC layer was reached by simultaneous action of high-frequency (up to 10 kHz) and low frequency (till 1000 Hz) pulse voltage. Thus, the frequency interval of light modulation at the electric field of the order of 2 V/mm (in comparison with helix FLC) has doubled, that extends the range of possible applications of this modulator. Its main advantages are the absence of distortions in the spectral composition of modulated light and the lack of light scattering, when the electric field switches off. Furthermore, the same pulse shape of low-frequency and high-frequency voltage (square wave) simplified the electronic control circuit design.

Now the method of spatially inhomogeneous phase modulation of light is developed for a new type helix-free FLC, where intensive bistable light-scattering takes place. The mechanism and electro-optical characteristics of the modulation of light scattering in such materials, parameters of the bipolar pulse regime as well as prospects for the practical use in laser display devices are discussed.

The periodic deformation of smectic layers in the absence of an electric field and the soliton mechanism of reorientation of FLC director in an electric field is theoretically substantiated at the transition to Maxwell mechanism of energy dissipation. A solution was found that describes the structure of smectic layers deformed in a direction, which is orthogonal to substrates, and a period of deformations of about 4 nm is consistent with experimental data. The equation was solved that describes the change of director orientation in smectic layers under the influence of an electric field, and this solution can be regarded as a periodic wave, localized in the soliton, and its «filling» is a train of solitons. The graph of this wave has the form of a wave packet.

The frequency dependence of an electro-optical response and the birefringence index, and field dependence of the electro-optical response are experimentally investigated. It is shown that the transition to the Maxwell mechanism of energy dissipation is accompanied by a strong frequency dependence of the response time, but for further frequency increase, when the transition to the

soliton mode is, the response time is determined by the speed of soliton waves, and the frequency dependence of the response is practically absent. The maximum change in the birefringence index (decrease about 1.5 times) occurs during the transition to the soliton mode. Time on and off of the scattering process (optical response time) is almost the same and does not exceed the duration of the pulse, initiating the scattering process. The prevalence of shear viscosity at a frequency of the field of more than 1 kHz reduces the response time several times.

It is shown that at a certain ratio between the amplitude and duration of the control voltage bipolar pulses, the energy of deformation of smectic layers and spontaneous polarization of FLC, the scattering process has the bistable character, and both optical state (of the maximum light transmission and the maximum light scattering) are retained for a few tens of seconds after the electric field switches off or until the arrival of a pulse of the opposite polarity.

Recent experiments have also shown that under certain conditions, namely, the characteristics of FLC and FLC-cell and parameters of the bipolar pulse regime, the spatially inhomogeneous phase modulation of passed through FLC-cell laser radiation, required to destroy its ability to interference and speckle formation, can be implemented at a single electric field frequency (not at two frequencies). But as long as these conditions require further study.

СЕКЦИЯ 2

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ
И ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ
С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАММНОЙ
ОПТИКИ**

SECTION 2

**IMAGING AND DISPLAY INFORMATION
USING HOLOGRAPHIC OPTICS**

СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ НА НЕПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Смородинов Д.С., Корешев С.Н., Никаноров О.В.

*(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург)*

Аннотация

Рассмотрено влияние бинаризации и диффузной подсветки объекта на глубину резкости изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля. Приведены результаты экспериментального исследования, подтверждающие возможность и эффективность использования специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля для синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для реализации голографического варианта фотолитографического процесса на неплоских поверхностях.

Ключевые слова: синтез голограмм, криволинейная поверхность, фотолитография, объемный объект, голограмма-проектор Френеля, глубина резкости, бинаризация, диффузная подсветка.

Введение

Современное развитие электроники и микропроцессорной техники невозможно без постоянного совершенствования технологии фотолитографии. В настоящее время можно выделить устойчивую тенденцию к уменьшению размеров электронных и оптоэлектронных элементов, обуславливающую необходимость увеличения разрешающей способности используемых для их изготовления оптических фотолитографических систем. Традиционный метод повышения разрешающей способности оптической системы основан на увеличении ее апертуры и уменьшении рабочей длины волны. Его применение, как правило, приводит к уменьшению глубины резкости оптической системы и к уменьшению размеров одномоментно отображаемого участка изготавливаемого изделия. Из этого следует практическая невозможность использования традиционных фотолитографических систем для получения больших по площади изображений с высоким разрешением на неплоских поверхностях. В качестве примеров таких криволинейных поверхностей можно привести полусферу, конус, параболоид, гиперболоид и другие поверхности, которые используются при изготовлении разнообразных оптических элементов, электротехнических разводок проводников, сеток, шкал, экранов и др.

Используемые в настоящее время технологии получения структур на подобных поверхностях весьма трудоемки и обладают целым рядом ограничений, среди которых можно отметить невозможность одновременного экспонирования значительного по площади участка поверхности изделия и сложность обеспечения равномерного освещения неплоских шаблонов.

В связи с этим весьма перспективным, на наш взгляд, представляется использование для этих целей голограмм-проекторов. В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [1, 2], голограмм сфокусированного изображения [3, 4] и синтезированных голограмм [5, 6]. Особый интерес вызывают фотолитографические системы, использующие отражательные рельефно-фазовые синтезированные голограммы-проекторы. В качестве основных преимуществ таких голограмм-проекторов можно назвать возможность синтеза голограмм виртуальных объектов сложной формы с последующим восстановлением изображения на неплоских поверхностях и отсутствие необходимости использования оптических материалов, прозрачных в рабочем диапазоне спектра. Кроме того процесс их создания не требует применения реального фотошаблона сложной формы и обеспечения его специфической подсветки, обеспечивающей равномерное освещение его поверхности. Отметим также, что синтезированная голограмма, предназначенная для рассматриваемого фотолитографического процесса на криволинейных поверхностях, может быть выполнена на плоской подложке, что существенно облегчает процесс ее отображения на носителе.

Метод синтеза голограмм-проекторов Френеля для фотолитографии на неплоских поверхностях

Из доступной нам литературы, посвященной синтезу и отображению на носителе голограмм-проекторов, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе, наибольший интерес вызывают работы [5-7]. Отметим, что демонстрация фотолитографического процесса, реализованного с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля, впервые была описана в [7]. Синтез использованной при этом голограммы осуществлялся с помощью разработанного авторами специализированного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля [8]. Реализованный в этом комплексе метод синтеза и восстановления основан на принципе Гюйгенса. В нем заложено математическое описание физических процессов записи и восстановления голограмм-проекторов Френеля, основанное на идее сложения полей, порожденных типовыми элементами структуры объекта.

При разработке этого метода, предназначавшегося для моделирования телецентрического хода лучей при освещении фотошаблона, предполагалось, что одинаковые элементы структуры объекта, формируют одинаковую картину распределения комплексных амплитуд на плоскости голограммы, до момента наложения опорной волны. Следовательно, если представить

объект в виде набора одинаковых элементов, то останется только рассчитать распределение комплексной амплитуды для каждого типа элементов из этого набора. Такое распределение было условно названо штампом, а основанный на его использовании метод синтеза голограмм - методом штамповки. В соответствии с ним процесс расчета голограммной структуры сводится к последовательному наложению штампов в соответствующие области голограммы. При этом в областях пересечения производится сложение комплексных амплитуд парциальных волновых полей, порожденных типовыми элементами структуры объекта (рис. 1). Отметим, что

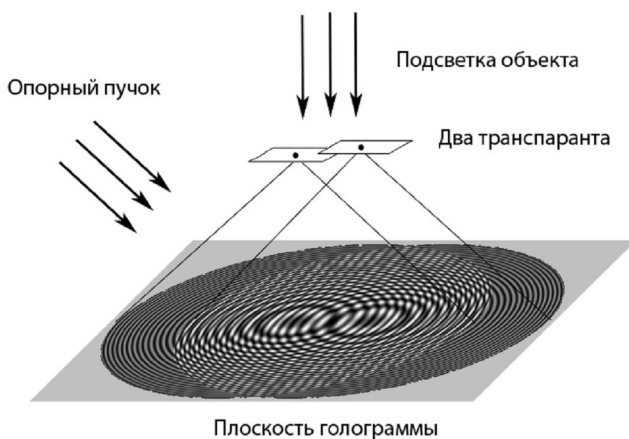


Рис. 1. Схема синтеза голограммы-проектора изображения, нанесенного на неплоскую поверхность

В данной работе рассматривается случай внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этом объект, т.е. фотошаблон, освещаемый падающим по нормали к нему параллельным пучком света, представляется в виде совокупности двумерных амплитудных бинарных транспарантов, расположенных параллельно плоскости синтеза голограммы, на разном удалении от нее так, что геометрический центр каждого из них считается лежащим на нормали, восстановленной из центра голограммы. При таком взаимном расположении объекта и голограммы штамп объектного поля, т.е. математическое описание пространственного распределения комплексной амплитуды волны, порожденной типовым элементом объекта, имеет вид матрицы, подобной математическому образу голограммы. Пространственно штамп привязывается к той же плоскости что и голограмма, т.е. они совмещены, при этом центр типового элемента объекта считается лежащим на нормали, восстановленной из центра штампа. Его размер может быть рассчитан тем же способом, что и размер голограммы исходя из габаритов типового элемента и параметров схемы синтеза.

После завершения процесса штамповки, рассчитанная для каждой точки плоскости синтеза голограммы амплитуда объектной волны складывается с соответствующей амплитудой опорной волны. Полученная таким образом сумма амплитуд возводится по модулю в квадрат и, тем самым, рассчитывается распределение интенсивности голографического поля, соответствующего синтезируемой голограмме-проектору.

Отметим, что настоящая работа направлена на исследование особенностей синтеза и восстановления голограмм объектов, представляющих собой не плоские транспаранты, а транспаранты, выполненные на некой криволинейной поверхности. Поэтому при синтезе голограмм-проекторов существует необходимость разбиения виртуального объекта на набор плоских транспарантов, расстояние между которыми не должно превышать глубину резкости голограммы.

Глубина резкости

Глубина резкости представляет собой один из важнейших параметров фотолитографических проекционных систем [9]. Определим ее для описанного выше случая внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этих условиях числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (1)$$

где A – числовая апертура пучка, n – показатель преломления среды между фотошаблоном и голограммой (для воздуха $n = 1$), α – апертурный угол дифрагировавшего излучения; λ – рабочая длина волны; a_t – характеристический размер фотошаблона, т.е. минимальный размер элемента его структуры. Из интерференционной теории формирования изображения следует, что глубина резкости формируемого изображения не может превышать значения, описываемого выражением [10]

$$|b| \ll \frac{2\lambda n}{A^2}. \quad (2)$$

В оптике при расчете значения глубины резкости реальных оптических систем традиционно пользуются более строгим выражением [11]

$$b = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}. \quad (3)$$

Из представленных выражений видно, что чем больше числовая апертура, а соответственно и разрешающая способность проекционной системы, тем меньше глубина резкости получае-

мого изображения, и, следовательно, чаще должны располагаться плоские транспаранты при синтезе голограммы объекта, представляющего собой изображение, нанесенное на криволинейную поверхность.

Влияние особенностей структуры голограмм-проекторов на глубину резкости восстанавливаемого изображения

Важной особенностью синтезированных голограмм-проекторов, пригодных для практического использования в фотолитографическом процессе, является то, что для обеспечения работы в коротковолновой области спектра они должны быть рельефно-фазовыми и отражательными. При этом сложность, а в ряде случаев и невозможность, отображения требуемой формы профиля рельефа обуславливает необходимость бинаризации голограмм перед их отображением на носителе.

С целью исследования влияния бинаризации на глубину резкости изображения, с помощью разработанного ранее программного комплекса [8] были синтезированы и численно восстановлены отражательные рельефно-фазовые голограммы-проекторы Френеля, предназначенные для работы в излучении с длиной волны 13,5 нм. Синтез осуществлялся при использовании параметров, выбранных в соответствии с результатами работы [12].



Рис. 2. Изображение исходного объекта

В качестве объекта использовалось представленное на рис. 2 бинарное изображение объекта размером 23×23 пикселя, обладающее характеристическим размером 80 нм (ширина самой тонкой линии на рис. 2). Размер синтезированных голограмм-проекторов был равен 435×435 пикселей, угол падения опорного пучка – $14,7^\circ$, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы было принято равным 20,35 мкм. Глубина резкости восстановленного изображения при таких параметрах синтеза, согласно выражению (3), должна быть равна ± 237 нм.

В ходе настоящего исследования сравнивались изображения, полученные с помощью полутонковой голограммы и голограмм, бинаризованных при двух оптимальных, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровнях бинаризации – 0,33 и 0,22 и при неоптимальном уровне – 0,35 [13]. Расчет распределения интенсивности восстановленного изображения проводился для плоскостей, располагающихся параллельно голограмме на расстоянии 50 нм друг от друга. Расстояние от первой из указанных поверхностей до плоскости голограммы было на 400 нм меньше расстояния от плоскости голограммы до объекта, использовавшегося при синтезе голограммы. Расстояние от голограммы до последней поверхности на 400 нм превышало его. В качестве критерия качества изображения, восстановленного в каждой из указанных плоскостей, принималось, как обычно, число допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения [7]. Результаты исследования представлены на рис. 3 в виде графиков зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки, отнесенных к максимальному числу уровней, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы, от величины дефокусировки. Под последней понималось расстояние между плоскостью, в которой проводился анализ и плоскостью наилучшей фокусировки изображения, располагающейся на том же расстоянии от голограммы, что и объект при ее синтезе. Из представленных графиков следует, что бинаризация синтезированной голограммы практически не оказывает влияния на глубину резкости восстанавливаемого изображения. Наблюдаемые же небольшие отличия в форме представленных на рис. 3 кривых связаны с общим ухудшением качества изображения при переходе от полутонковой голограммы к бинарным голограммам.

Исследование характера влияния диффузной подсветки объекта на глубину резкости синтезированных голограмм осуществлялось путем синтеза и последующего цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля при 6 различных значениях пределов случайного изменения фазы проходящей через объект волны ($0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, 3\pi/2$ и 2π). Цифровое восстановление этих голограмм-проекторов, осуществлялось для значений расстояния от объекта до голограммы, отличавшихся от расстояния, использовавшегося при синтезе, на величины от -400 до 400 нм. Шаг изменения расстояния был выбран равным 50 нм. Работа выполнялась для того же тестового объекта и при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм, которые были использованы в предыдущем эксперименте.

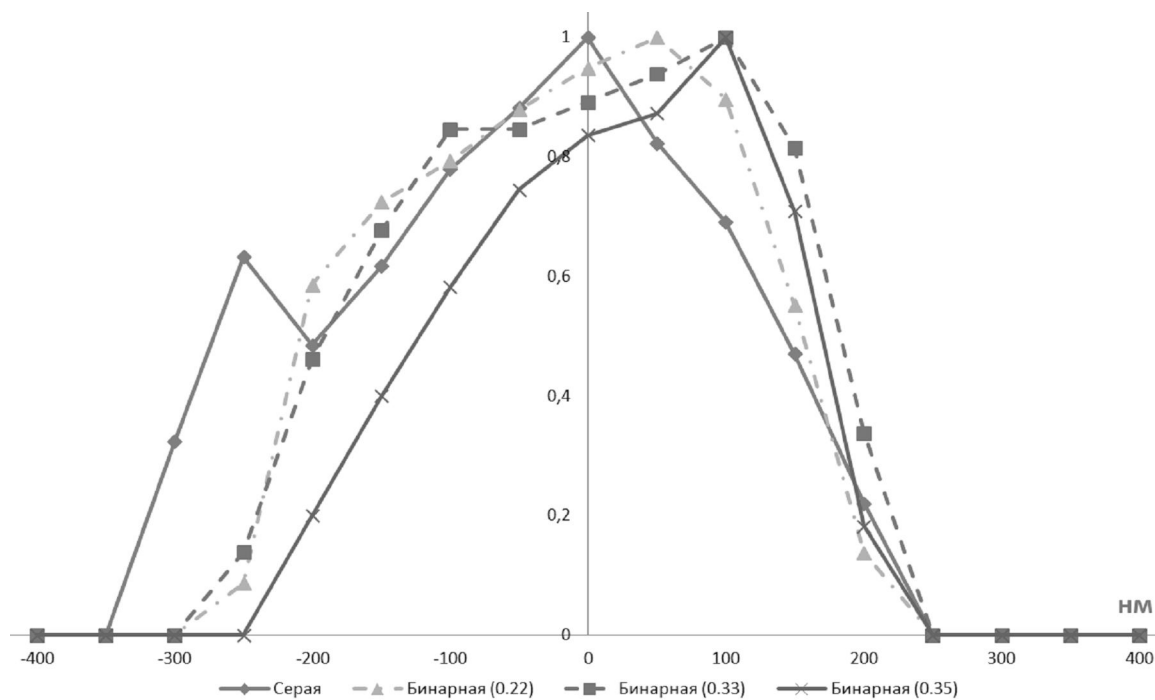


Рис. 3. График зависимости качества изображения от величины дефокусировки при восстановлении бинарных голограмм

Результаты исследования, нормированные по максимальному числу градаций, представлены на рис. 4. Необходимо заметить, что на представленном графике не наблюдается значительных отличий глубины резкости при восстановлении голограмм с разными вариантами диффузной подсветки, а уменьшение диапазона допустимых уровней пороговой обработки связано с общим ухудшением качества изображения при увеличении диапазона случайного изменения фазы. Качество изображения, получаемого с помощью исследуемых голограмм при отсутствии дефокусировки, иллюстрирует рис. 5.

Демонстрация пригодности синтезированных голограмм-проекторов для формирования изображения на неплоских поверхностях

Рассмотренный выше метод синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях предполагал разбиение виртуального криволинейного объекта на набор плоских транспарантов, расстояние между которыми не превышает глубину резкости голограммы-проектора. Возможность и эффективность такого представления объекта при синтезе голограммы-проектора была продемонстрирована экспериментально. С этой целью были синтезированы голограммы объекта, представляющего собой два пространственно разнесенных изображения перекрестий, расположенных на различных расстояниях от голограммы. Разни-

ца расстояний от голограммы до первого и второго перекрестий изменялась от голограммы к голограмме и лежала в пределах от 200 до 700 нм, с шагом 100 нм. Работа выполнялась при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм, которые были использованы в предыдущих экспериментах. Восстановление каждой голограммы проводилось для двух значений расстояния между ней и плоскостью регистрации изображения (h_1 и h_2), каждое из которых обуславливало наилучшее восстановление изображения соответствующего транспаранта. Результаты проведенного исследования представлены на рис. 6. Необходимо отметить, что расчётная глубина резкости голограмм при выбранных параметрах их синтеза в соответствии с выражением (3) составляла ± 237 нм.

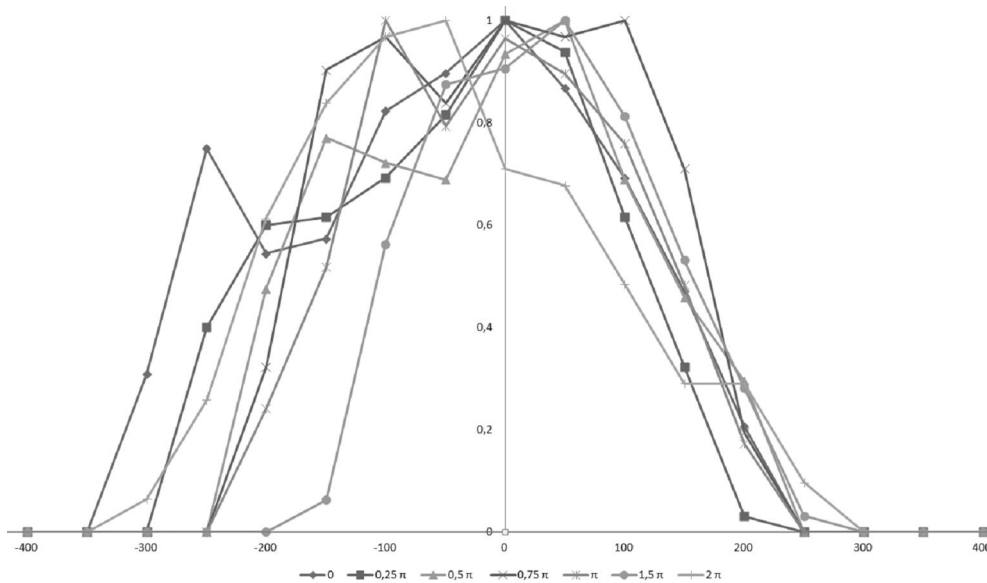


Рис. 4. График зависимости качества изображения от величины дефокусировки для разных величин диапазона диффузной подсветки $\Delta\varphi$.

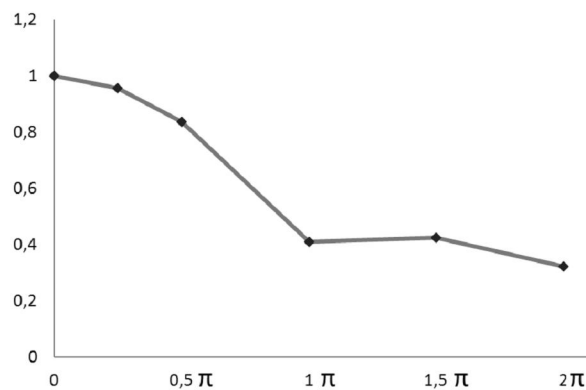


Рис. 5. График зависимости качества изображения от величины диапазона диффузной подсветки

Из приведенных результатов видно, что пока расстояние между транспарантами не превышает рассчитанную величину глубины резкости, изображения обоих перекрестий остаются достаточно чёткими, что и отображено на рис. 6 (*а – в*). На рис. 6 (*б, в*) заметно, что у границы глубины резкости изображение начинает расплываться, но структура перекрестия все ещё сохраняет различимые границы. Дальнейшее увеличение расстояния между транспарантами, как показывают рис. 6 (*г – е*), приводит к значительному ухудшению качества изображения.

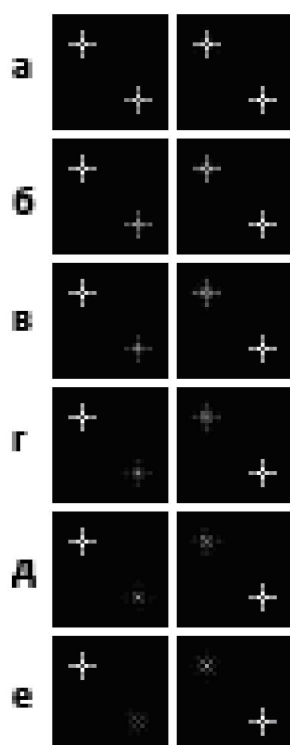


Рис. 6. Изображения, восстановленные в плоскостях, удаленных от голограммы на расстояния h_1 (слева) и h_2 (справа) при различном расстоянии между транспарантами Δh при синтезе голограммы. $\Delta h = 200$ нм (а), $\Delta h = 300$ нм (б), $\Delta h = 400$ нм (в), $\Delta h = 500$ нм (г), $\Delta h = 600$ нм (д), 700 нм (е)

Заключение

В работе описаны особенности алгоритма и программы синтеза голограмм-проекторов Френеля, формирующих изображения на неплоских поверхностях. Сообщается об адаптации специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля под синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях. Рассмотрена глубина резкости восстанавливаемого изображения и влияние на нее бинаризации и диффузной подсветки транспаранта. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие возможность и эффективность использования программного комплекса для синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для реализации фотолитографического процесса на неплоских поверхностях.

Список литературы

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал, 2004. – Т. 71. – № 10. – С. 32-39.
2. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Holographic method for obtaining images with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Proc. SPIE, 2004. – Vol. 5290. – P. 221-232.
3. Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfoy S., Darbellay Y. Holographic microlithography. Opt. Eng, 1995. – Vol. 34. – № 9. – P. 2724-2730.
4. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Оптика и спектроскопия, 2006. – Т. 101, – №6, – С. 1038-1042.
5. Jacobsen C., Howells M. Projection x-ray lithography using computer-generated holograms: a study of compatibility with proximity lithography // J. Appl. Phys. 1992. – Vol. 71. – P. 2993-3001.
6. Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A. Design and fabrication of a high-efficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram // Appl. Opt. 2007. – Vol. 46. – № 14. – P. 2581-2585.

7. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Ратушный В.П. Восстановление синтезированных голограмм-проекторов Френеля при углах падения восстанавливающей волны, превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы // Оптика и спектроскопия, 2011. – Т. 111. – № 1. – С. 156-161.

8. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козулин И.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения // Оптический журнал, 2010. – Т. 77. – № 1. – С. 42-48.

9. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 21 с.

10. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980. – 172 с.

11. Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Карпов В.Г., Кривопустова Е.В., Ежова К.В., под редакцией профессора Шехонина А.А. Прикладная оптика. Часть 2. Учебно-методическое пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2003. – С. 32.

12. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии // Оптический журнал, 2008. – Т. 75. – № 9. – С. 29-34.

13. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Громов А.Д., Никаноров О.В. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // Оптика и спектроскопия, 2013. – Т. 114. – № 2. – С. 150-155.

SYNTHESIZING HOLOGRAM-PROJECTORS FOR PHOTOLITHOGRAPHY ON NONPLANAR SURFACES

Smorodinov D.S., Koreshev S.N., Nikanorov O.V.

(University ITMO, Saint-Petersburg)

This paper discusses how binarization and diffuse illumination of an object affect the depth of field of an image reconstructed by means of synthesized Fresnel hologram-projectors. It presents the results of an experimental study that confirm the possibility and efficiency of using a specialized software complex to synthesize and reconstruct Fresnel hologram-projectors intended for the implementation of a holographic version of the photolithographic process on nonplanar surfaces.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ СТРУКТУР НА МАТЕРИАЛЕ ПФГ-01

Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н.¹, Маурер И.А., Черных Д.Ф.

(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург;

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Оптические диффузоры являются важным элементом подсветки различных оптических систем, таких как жидкокристаллические дисплеи, рекламные панели, проекционные системы и т.д. [1]. Такие диффузоры удобно формировать, используя голографические методы. Нами предложено два основных способа создания голографических диффузоров: регистрация по безопорной оптической схеме Габора объекта в виде обычного матового стекла [2] или использование в качестве регистрируемого объекта амплитудной мультиплексной голограммы [3], представляющая собой набор наложенных друг на друга идентичных дифракционных решеток.

Для создания диффузоров мы использовали отечественный галоидосеребряный голографический фотоматериал ПФГ-01, обладающий достаточно высокой светочувствительностью, для которого применим ряд эффективных методов преобразования амплитудной голографической записи в рельефно-фазовую [4,5].

Важным элементом схемы регистрации диффузоров по безопорной оптической схеме Габора является апертурная диафрагма, ограничивающая освещенное поле регистрируемого диффузора на основе обычного матового стекла. Рассматривались два предельных случая формы апертуры с отношением внешнего диаметра к внутреннему d_1/d_2 порядка 1,06 – 1,07 (апертура в виде кольца) и $d_1/d_2 = \infty$ (апертура в виде круга).

Процесс регистрации амплитудной мультиплексной голограммы и оптическая схема записи диффузоров с использованием мультиплексной голограммы подробно описаны в статье [3]. Основными параметрами в данном варианте являются фиксированный угла $\delta = 2\pi/N$, на который поворачивается фотопластинка при мультиплексной регистрации $N/2$ идентичных дифракционных решеток, а также угол схождения γ двух плоских волн, формирующих решетку. Угол δ определяет количество плоских волн, которые генерирует амплитудная мультиплексная голограмма при освещении ее световой волной. Эти волны проходят через оптическую схему пространственной фильтрации с кольцевым пространственным фильтром для подавления волны нулевого порядка дифракции и уменьшения когерентного шума и собираются на фотопластинке, которая после проявления и фиксирования представляет собой амплитудную голограмму-диффузор.

Диффузоры с высокой эффективностью пропускания света на галоидосеребряных фото-слоях могут быть созданы только на основе чисто рельефно-фазовых структур. Технологии преобразования первичной амплитудной голографической структуры в рельефно-фазовую позволяют получать глубину поверхностного рельефа порядка 1 мкм, что допускает использование полученных структур в качестве эталонов для промышленного тиражирования методом тиснения. Формирование поверхностного рельефа на макроуровне с характерными размерами, превышающими длину волны видимого света, происходит за счет периодической пространственной модуляции физико-химических свойств желатина на молекулярном уровне в соответствии с регистрируемой на голограмме интерференционной картиной.

Нами использовались два альтернативных способа реализации модуляции физико-химических свойств желатина:

1. Структурирование – образование надмолекулярной структуры с помощью избирательного дублирования (сшивание молекул желатина) в отбеливающих растворах, содержащих бихроматы (например, отбеливатель R-10) [4]. Формирование рельефа связано с перераспределением объемов желатина в слое фотоэмульсии и окончательной сушкой после отбеливания.

2. Деструкция – разрыв основных связей в цепях желатиновых молекул под воздействием коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 250 нм (метод ВКУФ) [5]. Рельеф образуется в результате травления облученного желатина в водных растворах.

Различный механизм воздействия на желатин эмульсионного слоя рассматриваемых методов получения рельефа должен приводить к появлению отличий в формируемом рельефе, в толщине эмульсионного слоя, в оптических характеристиках диффузоров и т.д. В обоих случаях серебряное изображение полностью удалялось из фотоэмульсии, в результате чего получался диффузор с чисто рельефно-фазовой структурой.

Исследование микроструктуры поверхности одного и того же образца диффузора, обработанного разными методами, показало, что характерный размер элементов структуры поверхности, полученной методом ВКУФ, значительно больше по сравнению со структурами, полученными при отбеливании в R-10. Этот факт объясняется тем, что получение фазового рельефа с помощью избирательного дублирования связано с подавлением низких пространственных частот.

Структура поверхностного рельефа полученных по безопорной схеме Габора диффузоров носит случайный характер, поскольку в основе их получения лежит регистрация перекрестной интерференции случайного волнового поля. Это хорошо подтверждается измеренными с помощью профилометра ХР-1 «Ambios» профилями рельефа поверхности. Структура диффузоров, полученных на основе мультиплексной голограммы, на первый взгляд, также является случайной. Однако нами показано, что рельефно-фазовые структуры таких диффузоров могут сохранять значительную степень регулярности, что существенно влияет на их оптические характеристики.

Также необходимо отметить большое различие в средней толщине T эмульсионного слоя после применения метода ВКУФ ($T = 1,4 \div 3,35$ мкм) и дубящего отбеливания ($T = 4,5 \div 6,35$ мкм), что согласуется с физической сутью методов обработки, связанных либо с деструкцией и удалением разрушенного желатина (метод ВКУФ), либо со структурированием желатина (дубящее отбеливание).

Для практических применений важно, чтобы через голографические диффузоры проходила минимальная доля нерассеянной компоненты падающего света. Интенсивность этой компоненты определяется, прежде всего, величиной фазового возмущения, вносимого в волновой фронт диффузором, и зависит от высоты колебаний поверхностного рельефа. Экспериментально измеренные минимальные значения интенсивности нерассеянной компоненты света $I_{0\min}$, прошедшего через диффузор, могут как превышать значение 0,1 %, так и лежать ниже этой величины в зависимости от использованной оптической схемы регистрации диффузора и вида фотохимической обработки.

Экспериментальные данные для лучших образцов диффузоров, обладающих минимальными значениями интенсивности нулевого порядка $I_{0\min}$, сведены в таблицу, из которой следует существенное влияние формы апертуры первичного диффузора в оптических схемах регистрации. Можно сказать, что мультиплексная голограмма эквивалентна матовому стеклу с бесконечно тонкой кольцеобразной апертурой. Переход от круговой апертуры к кольцу позволяет избежать записи самых низких пространственных частот, повысить контраст интерференционной картины в области светочувствительной среды и в конечном итоге получить более глубокую модуляцию поверхностного рельефа и большее значение среднеквадратичного отклонения высоты поверхности σ .

Основываясь на теории рассеяния света на крупномасштабных неоднородностях в приближении Кирхгофа с гауссовым распределением высоты поверхности [6], можно показать, что требуемые значения среднеквадратичного отклонения высоты поверхности σ для получения $I_0 \leq 0,1$ % должны лежать в области примерно 0,5 мкм. Однако для экспериментальных образцов диффузоров, изготовленных при использовании мультиплексной голограммы, удается получить структуры с величиной σ в 1,4 – 1,8 раз меньше, чем значения σ , предсказываемые теорией для малых значений нерассеянной компоненты ($I_0 \leq 0,1$ %). Объясняется это тем, что структура данных диффузоров, внешне выглядящая как случайная, в значительной степени сохраняет регулярность, которая происходит из упорядоченной структуры самой мультиплексной голограммы.

Таблица

Первичный рассеиватель, объект регистрации	Круговая апертура, матовое стекло	Кольцевая апертура матовое стекло	Мультиплексная голограмма
Отношение внешнего диаметра к внутреннему d_1/d_2	∞	1,06 – 1,07	1
$I_{0 \text{ min}}$, %	0,74	0,1 – 0,2	0,05 – 0,07

Экспериментально показано, что предельная ширина индикатрисы рассеяния голографических диффузоров, независимо от способа получения, ограничена углами порядка 10 градусов, что связано с наблюдаемым для галоидо-серебряных фотоматериалов спадом пространственно-частотной характеристики с ростом пространственной частоты.

Исследования показали, что оба альтернативных метода преобразования амплитудных голографических структур в рельефно-фазовые, независимо от метода регистрации амплитудной голограммы-диффузора, позволяют создавать глубокий поверхностный рельеф, необходимый для изготовления высокоэффективных узконаправленных диффузоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S.I., Chi Y.S., Nam Y.N., Park Gh.Y., and Kim J.M. // Appl. Opt. 2003. – Vol. 42. – № 14. – P. 2482-2491.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Гурин А.С., Крамущенко Д.Д., Маурер И.А., Черных Д.Ф. / ЖТФ. 2009. – Т. 79. – Вып. 7. – С. 76-80.
3. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // ЖТФ. 2014. – Т. 84. – В. 12. – С. 112-116.
4. Smith H.M. Photographic Relief Images // J. Opt. Soc. Am. 1968. – Vol. 58. – № 4. – P. 533–539.
5. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. – Т. 70. – № 2. – С. 45-49.
6. Bass F.G., Fuks I.M. // Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces. New York: Pergamon. 1979. Chapter 7. – P. 220-315.

SURFACE RELIEF CHARACTERISTICS OF RANDOM PHASE STRUCTURES ON THE MATERIAL PFG-01

Ganzherli N., Gulyaev S.¹, Maurer I., and Chernykh D.

(Ioffe Institute, St. Petersburg,

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)

Parameters of holographic diffusers obtained by using two different ways of fabrication are compared in which an object was either a common ground glass in a reference-free optical Gabor scheme or an amplitude multiplex hologram (that was a set of superimposed identical holographic gratings) in an optical filtering scheme.

The transformation of the amplitude holographic recording on the photographic material PFG-01 into the relief-phase one was performed by using either the method of selective chemical hardening in the bleacher R-10 or destructive action of the short-wave UV radiation on the emulsion layer gelatin.

It is shown that the suggested techniques make it possible to create high-efficient narrow-directed holographic diffusers.

ОБЪЕМНАЯ ГОЛОГРАММА ИЗНУТРИ: ЛАЗЕРНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ С ЦЕНТРАМИ ОКРАСКИ

Вениаминов А.В., Захаров В.В., Ангервакс А.Е., Щеулин А.С., Рыскин А.И.

*(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (С-Пб. НИУ ИТМО),
г. Санкт-Петербург)*

Возможности построения объёмных изображений микроскопических участков, находящихся в толще оптических сред, и измерения локальных значений интенсивности люминесценции, отражённого и проходящего света, предоставляемые лазерной сканирующей микроскопией, позволяют обнаруживать и анализировать детали строения объёмных голограмм, скрытые при изучении их интегральных дифракционных характеристик. В ходе исследования голограммных решёток, записанных в фотохромных кристаллах фторида кальция с центрами окраски, обнаружен эффект самоорганизации центров.

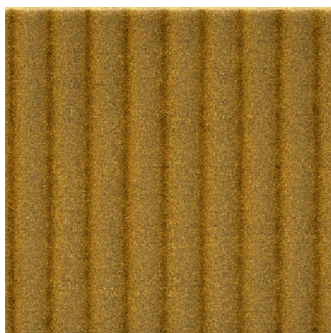
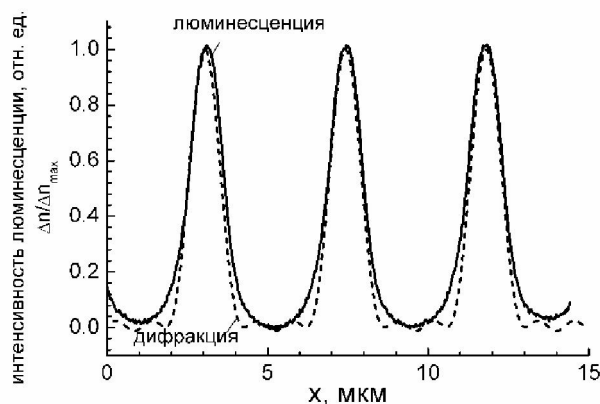


Рис. 1. Полученное путём сканирования в плоскости вектора решётки изображение («оптический срез») участка голограммной решётки с пространственным периодом 5 мкм, записанной в фотохромном кристалле флюорита с центрами окраски. Лазерный сканирующий микроскоп LSM710 (Zeiss)

Построение даже двумерных оптических срезов объёмной голограммной решётки средствами конфокальной сканирующей микроскопии (рис. 1) даёт возможность строить пространственные профили распределения составляющих голограмму центров, которые демонстрируют хорошее соответствие профилям оптических параметров голограммы, реконструированным по результатам измерения угловой селективности дифракции света на её пространственных гармониках [1] (рис. 2), что позволило использовать конфокальную микроскопию для количественного исследования постэкспозиционных трансформаций голограмм [2]

Рис. 2. Поперечные профили голограммной решетки, записанной в кристалле фторида кальция с центрами окраски, построенные путём сканирования люминесцентного изображения решётки в конфокальном микроскопе (сплошная линия) и суммирования 5 пространственных гармоник показателя преломления, рассчитанных с использованием контуров угловой селективности голограммы (штриховая линия)



Существенно более богатые возможности для визуализации и изучения микроструктуры голограмм даёт трехмерное сканирование и построение их объёмных изображений, подобных показанному на рис. 3.

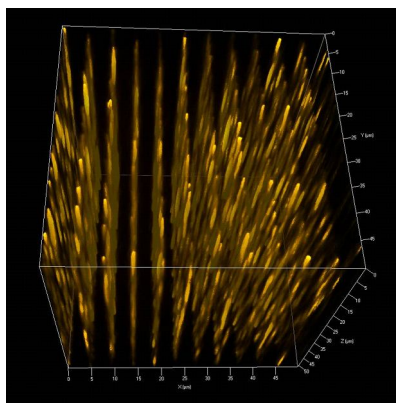


Рис. 3. Изображение в отраженном свете объемного участка $50 \times 50 \times 50$ мкм голограммной решетки с пространственным периодом 4,5 мкм в фотохромном кристалле флюорита, полученное путем трехмерного сканирования сфокусированным лазерным пучком. Видны вытянутые образования из центров окраски, составляющие «плоскости» – тонкие слои в областях минимумов интенсивности записанной интерференционной картины

Механизм записи голограмм в кристаллах фторида кальция (флюорита) с центрами окраски основан на фототермическом преобразовании центров и их пространственном перераспределении в объеме кристалла, в ходе которого вакансии и электроны, составляющие центры окраски, покидают пучности интерференционного поля и концентрируются в его узлах в форме новых центров. Увеличение плотности центров окраски в этих плоскостях, равно как и температура, при которой производится запись ($150-200$ °С), благоприятствуют образованию высоко-агрегированных центров, «квазиколлоидных» (вакансий и электронов числом от 5 до сотен тысяч) и «коллоидных». Последние представляют собой двумерные металлические (кальциевые) островки, в которые преобразуются крупные скопления этих компонент при температуре записи; при толщине 1,3-1,4 нм они имеют значительные латеральные размеры (20-200 нм), и их можно рассматривать как проявление микрофазного расслоения кристалла. В такой ситуации происходящее в процессе записи голограммы постоянное образование и разрушение всех центров окраски, в том числе коллоидных, размягчает решетку и – в соответствии с представлениями синергетики – создает условия для самоорганизации чужеродных для кристалла элементов (в данном случае центров окраски) – возникновения состоящих из этих элементов статических или динамических протяженных структур (так называемые диссипативные структуры), которые видны на рис. 3 как извилистые вытянутые образования. Чем более жёсткими были условия записи голограммы (высокая температура, плотность мощности лазерного излучения), тем выше концентрация коллоидных центров, тем более неоднородно структурированными оказываются слои максимальной концентрации центров – в пучки вовлекается большинство центров окраски (рис. 4) [3].

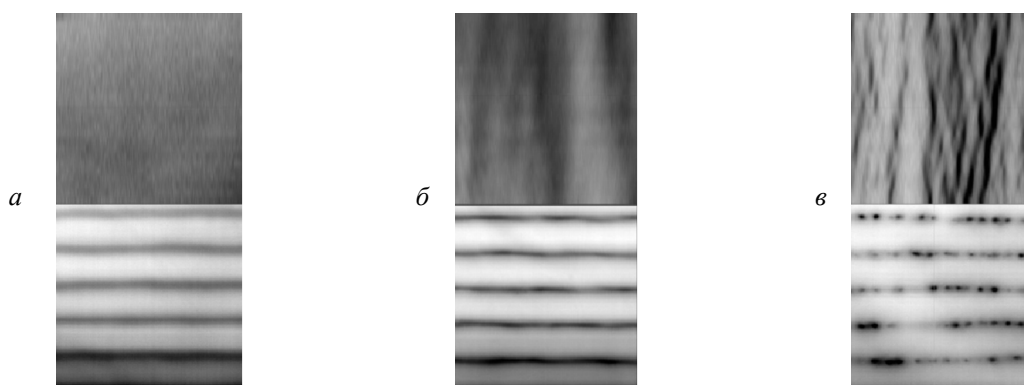


Рис. 4. Полученные с помощью конфокального сканирующего микроскопа изображения голограммных решеток с пространственным периодом 4,5 мкм (внизу – вид со стороны поверхности, через которую на кристалл падали записывающие решётку пучки,верху – вид «сбоку», со стороны изофазных поверхностей), записанных в кристаллах фторида кальция с центрами окраски излучением с длиной волны 532 нм при плотности мощности 0,3 (а) и 0,8 Вт/см² (б, в) и температуре 190 °С (а, в) и 150 °С (б). Пространственная неоднородность («зернистость») решетки проявляется в случае записи ее при достаточно высоких температуре и плотности мощности. Полная экспозиция – 3 (а, в) или 78 кДж (б) – прямо не влияет на степень пространственной неоднородности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veniaminov A.V., Shcheulin A.S., Angervaks A.E., Ryskin A.I.* Profile of a volume hologram in CaF_2 crystal with color centers as determined using confocal scanning microscopy. *JOSA B.* – 2012. – Vol. 29. – № 3. – P. 335-339.
2. *Shcheulin A.S., Angervaks A.E., Zakharov V.V., Veniaminov A.V., Ryskin A.I.* Holograms convertible by an incoherent photo-thermal treatment in CaF_2 crystals with color centers. *JOSA B.* – 2014. – Vol. 31. – № 2. – P. 248-254.
3. *Shcheulin A.S., Angervaks A.E., Veniaminov A.V., Zakharov V.V., Fedorov P.P., Kuznetsov S.V., Ryskin A.I.* Self-Organization of Color Centers in Holograms Recorded in Additively Colored CaF_2 Crystals. *Optical Materials.* 2015. DOI: 10.1016/j.optmat.2015.04.065.

VOLUME HOLOGRAM FROM INSIDE: LASER SCANNING MICROSCOPY OF HOLOGRAMS RECORDED IN CALCIUM FLUORIDE CRYSTALS WITH COLOR CENTERS

Veniaminov A.V., Zakharov V.V., Angervaks A.E., Shcheulin A.S., Ryskin A.I.

(ITMO University, St. Petersburg)

Confocal scanning microscopy has provided opportunities for looking into the volumes of holograms recorded in photochromic fluorite and made their local characteristics accessible. The local spatial profiles of luminescence and light absorption by color centers obtained using the microscope were found in good agreement with integral absorption and refraction profiles reconstructed basing on measured angular selectivity of the holograms; averaged local values of optical density follow macroscopic spectra, thus proving the technique's applicability for numerical measurements.

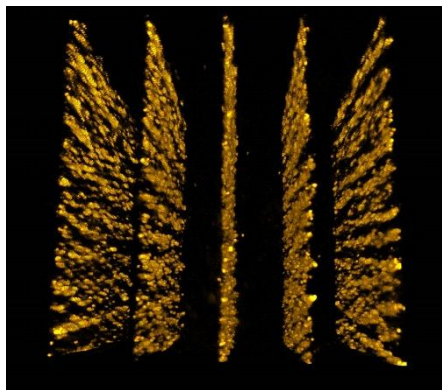


Fig. 1. Internal view of a holographic grating with spatial period $11\mu\text{m}$ recorded in a CaF_2 crystal with color centers, as reconstructed using 3D-laser scanning in reflected light with LSM710 (Zeiss)

However, only due to realistic volumetric images of holograms interior obtained by means of laser scanning microscopy, most direct access was gained to their microscopic architecture with diffraction-limited spatial resolution. Thus significant unevenness of holographic planes was revealed that does not manifest itself in traditional holographic diffraction measurements. The curled light-reflective threads observed in Fig. 1 are supposedly formed of highly-aggregated color centers.

The phenomenon is especially pronounced in the case of holographic recording under most severe conditions – at high temperature (190°C) and/or power density (but not total exposure); at more moderate conditions the profiles approach a sinusoid, and color centers fill the isophase planes uniformly.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЫ С ГОЛОГРАММНЫМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

Павлычева Н.К.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

В настоящее время практически все вновь разрабатываемые спектральные приборы оснащены голограммными дифракционными решетками. Особенно перспективно использование вогнутых голограммных дифракционных решеток с коррекцией аберраций, которые позволяют реализовать достаточно высокое разрешение при малых габаритах.

Разработанные нами методы расчета основаны на минимизации отдельных членов аберрационной функции вогнутой голограммной дифракционной решетки. Наиболее востребованными оказались два схемных решения: спектрограф с плоским полем и спектрограф с расширенным спектральным диапазоном [1].

При расчете спектрографа с плоским полем по нашей методике положение плоскости спектра фиксировано, она перпендикулярна лучу средней длины волны спектрального диапазона, дифрагированному в вершине решетки. В этом случае схема более компактна, и дисперсия практически не меняется по спектру. Начальными данными для расчета являются: частота штрихов в вершине решетки N , радиус кривизны дифракционной решетки r , расстояние от входной щели до вершины решетки d , угол падения φ и рабочий спектральный диапазон, ограниченный длинами волн λ_1 и λ_2 . Оптимизация схемы достигается соответствующим выбором расстояния от вершины решетки до плоскости регистрации спектра d'_0 и параметров записи решетки, т.е. расстояний от источников записи до вершины решетки d_1 и d_2 и углов падения пучков i_1 и i_2 из источников голографирования в вершину решетки.

Схема спектрографа с расширенным спектральным диапазоном была получена при совмещении требования плоского поля, с условиями коррекции в двух точках спектрограммы астигматизма и меридиональной комы. При поиске оптимального варианта проводились исследования аберрационной функции голограммной дифракционной решетки, а потом осуществлялся переход к параметрам нарезной решетки. Многочисленные расчеты различных вариантов схем позволили выявить эмпирические соотношения между конструктивными параметрами этой установки.

В качестве примера спектроанализаторов, оптические системы которых построены по описанным схемам, приведу двухканальный спектроанализатор для солнечного фотометра и спектроанализатор для исследования углеродных нанотрубок.

Двухканальный спектроанализатор состоит из двух спектрофотометрических каналов: канала для регистрации интенсивности прямого солнечного излучения (КПСИ) и канала для регистрации интенсивности рассеянного атмосферой солнечного излучения (КРСИ). Для минимизации уровня рассеянного света оба канала созданы на основе вогнутых голограммных дифракционных решеток. Расчет схем проводился по методике расчета «спектрографа с плоским полем». Радиус кривизны дифракционных решеток выбран равным 100 мм. Угол между лучами, идущими из вершины решетки в центр входной щели и на середину приемника, выбирался из конструктивных соображений таким, чтобы не требовалось введения плоского поворотного зеркала, и составил 30° . Размер приемной площадки приемника излучения 29 мм. В качестве фотоприемников используются линейные фотоприемники (CCD) типа TCD1304 фирмы TOSHIBA. Относительное отверстие 1:4,3.

Рабочий спектральный диапазон канала КПСИ 330...1030 нм, в центр диапазона приходит излучение с длиной волны 680 нм. Рабочий спектральный диапазон канала КРСИ 425...1030 нм,

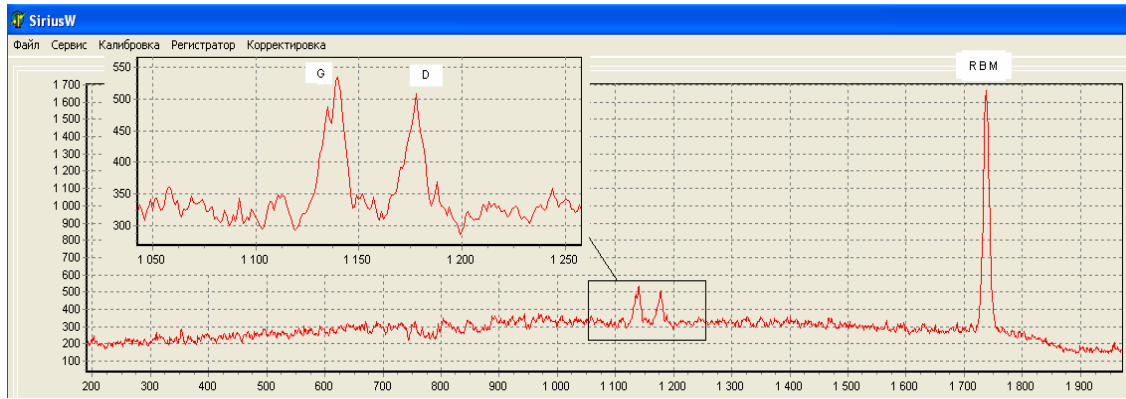
в центр диапазона приходит излучение с длиной волны 727,5 нм. Следовательно, обратная линейная дисперсия $d\lambda/dl$ составляет 24,14 нм/мм (КПСИ) и 20,86 нм/мм (КРСИ). Для обеспечения нужной дисперсии использованы дифракционные решетки, имеющие 397 штр./мм и 459 штр./мм, соответственно. Из расчета, проведенного по методике расчета спектрографа с плоским полем (длина волны записи 441,6 нм), получили следующие значения расстояний от входной щели до вершины решетки d , от вершины решетки до поверхности регистрации спектра d' , от источников записи до вершины решетки d_1 и d_2 , а также углов голографирования i_1 и i_2 : для канала КПСИ $d = 97,8$ мм, $d' = 97,925$ мм, $d_1 = 182,339$ мм, $d_2 = 158,744$ мм, $i_1 = 60^\circ 54' 54''$, $i_2 = 44^\circ 18' 49''$; для канала КРСИ $d = 97,6$ мм, $d' = 97,603$ мм, $d_1 = 202,453$ мм, $d_2 = 174,343$ мм, $i_1 = 57^\circ 05' 08''$, $i_2 = 39^\circ 33' 10''$. Для устранения остаточной дефокусировки использованы блоки светофильтров, которые устанавливаются перед приемником излучения для устранения излучения второго и третьего порядков. Светофильтры, установленные на крайних зонах спектра, выполнены в виде клиньев, углы которых обеспечивают коррекцию дефокусировки на краях спектрального диапазона. Светофильтры наклеивались на плоскопараллельную пластину с толщиной по оси 1 мм, изготовленную из кварцевого стекла КУ в канале КПСИ и стекла К8 в канале КРСИ.

Благодаря использованному техническому решению в приборе удалось обеспечить достаточно высокое для приборов такого класса спектральное разрешение 1 нм. Поляризующая способность канала КПСИ составила 1,6 %, канала КРСИ – 2,2 %, уровень рассеянного света на расстоянии 40 нм от лазерной линии 633 нм составил для канала КПСИ 0,00027, для канала КРСИ 0,0003.

В состав спектроанализатора для исследования углеродных нанотрубок (УНТ) [2] входят: источник лазерного излучения, коллиматор, короткофокусный светосильный объектив, подложка, на которую наносится исследуемое вещество, сферическое зеркало, собирающее рассеянное излучение, и направляющее его на входную щель, Notch-фильтр, светосильный спектрограф. Спектральные приборы для исследования спектров рамановского рассеяния должны иметь большую светосилу, низкий уровень рассеянного света и большую дисперсию. Использованный в установке спектрограф «Сириус» удовлетворяет этим требованиям: он имеет относительное отверстие 1:3, его оптическая схема основана на голограммных дифракционных решетках с коррекцией аберраций и имеет минимальное количество оптических деталей. Исследования проводились с дифракционной решеткой 1153 штр./мм, которая обеспечивает рабочий спектральный диапазон 486-680 нм. Конструктивные параметры спектрографа и дифракционной решетки рассчитаны по методу спектрографа с расширенным спектральным диапазоном. Спектрограф оснащен многоканальной системой регистрации спектра на основе диодной линейки с числом пикселей 2048 и размером пиксела 14×150 мкм². В спектрографе предусмотрена возможность перемещения приемника излучения по полю, т.к. длина спектра составляет 56 мм, а длина фоточувствительной площадки 29 мм. Это дало возможность исключить попадание возбуждающей лазерной линии на линейку. Для уменьшения рассеянного в приборе лазерного излучения перед входной щелью установлен Notch-фильтр – объемная фазовая отражательная решетка, обеспечивающая сильное подавление проходящего через него лазерного излучения в узкой полосе частот. При проведении экспериментов регистрировались спектры, полученные методом поверхностного усиленного рамановского рассеяния (SERS) на серебряной подложке.

На рисунке представлен спектр УНТ, полученный при следующих условиях: мощность лазера 200 мВ на длине волны 532 нм с Notch-фильтром, относительное отверстие 1:4, ширина входной щели 50 мкм.

Дифракционные решетки для обоих приборов по рассчитанным параметрам записи, с учетом заданных значений длины волны максимума концентрации энергии в спектре были изготовлены в НПО «Государственный институт прикладной оптики».



Таким образом, представленные примеры малогабаритных приборов на основе голограммных дифракционных решеток подтверждают перспективность их использования в различных областях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 197 с.
2. Павлычева Н.К., Хасан М. Оптический журнал. – 2012. – № 3. – С. 47-50.

COMPACT SPECTRUM ANALYZER WITH HOLOGRAPHIC DIFFRACTION GRATINGS

Pavlycheva N.K.
(*KNRTU-KAI, Kazan*)

We have developed methods of calculation based on the minimization of the individual members of the aberration function of a concave holographic grating. The most popular were two circuit solutions: flat field spectrograph and a spectrograph with an extended spectral range [1].

As an example, spectrum analyzers, optical systems are constructed according to the scheme described, will give a two-channel spectrum analyzer for the sun photometer and a spectrum analyzer for the study of carbon nanotubes.

Spectrum analyzer for the sun photometer consists of two spectrophotometric channel: channel for recording the intensity of direct solar radiation (KPSI) and channel for recording the intensity of solar radiation scattered by the atmosphere (KRSI). To minimize the level of ambient light, both channels are created on the basis of the concave holographic diffraction gratings. Calculation of schemes carried out by the method of calculating the «flat field spectrograph». In spectrum analyzer implements an elegant solution that will ensure a high luminosity with high spectral resolution, combining in one unit residual defocus compensation function with the function block higher order spectrum.

An experimental mounting for analyzing Raman scattering in carbon nanotubes includes: a source of laser radiation, a collimator, short-throw lens aperture, the substrate to be coated test substance, a spherical mirror that collects the scattered radiation, and sends it to the entrance slit, notch-filter aperture spectrograph [2]. Spectrographs to study the raman spectra should be of great luminosity, low levels of ambient light and a large variance. The spectrograph Sirius meets these requirements: it has a relative aperture 1:3, its optical scheme is based on holographic diffraction gratings with correction of aberrations and has a minimal number of optical components. The studies were conducted with a diffraction

grating 1153gr./mm, which provides a working spectral range 486-680 nm. The spectrograph is equipped with a multichannel recording system based on the spectrum of the diode line with the number of pixels 2048 and a pixel size of 1914 * 150 microns. To suppress the laser beam in front of the entrance slit set notch-filter. In the experiments, spectra were obtained by surface-enhanced raman scattering (SERS) on silver substrate.

Gratings for both devices to calculate the parameters of the recording were made in the NGO «State Institute of Applied Optics.»

Thus, the examples of small-sized devices based on holographic diffraction gratings confirm the perspective of their use in various fields of science and technology.

REFERENCES

1. *Pavlycheva N.K.* Spectral devices with nonclassical diffraction gratings. kazan: publishing house of kazan. state. tehn. univ, 2003. – 197 p.
2. *Pavlycheva N., Hassan M.J.* of Optical Technology, 2012. –Т. 77, № 3. – P. 160-162.

СДВИГОВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ И МИКРОТОМОГРАФИЯ С ИЗЛУЧЕНИЕМ ОТ ТОЧЕЧНОГО СВЕТОДИОДА

Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Минаев В.Л.

*(Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений
(ВНИИОФИ), г. Москва)*

Фазовые объекты, прозрачные для излучения видимого оптического диапазона, широко распространены как в промышленности, так и в биологии и медицине. Эти объекты описываются трехмерным (3D) пространственным распределением показателя преломления, с которым связаны плотность, температура, концентрация и другие физические параметры объекта [1].

При изучении фазовых объектов встает задача их визуализации, так как они обычно прозрачны для зондирующего излучения. На сегодняшний день широко известны следующие методы:

- фазового контраста или метод Цернике [2];
- интерференционного контраста [3];
- дифференциально-интерференционного контраста (DIC) или метод Номарского [4]. Этот метод является фактически методом сдвиговой интерферометрии;
- тёмного поля [5].

Количественные исследования характеристик фазовых объектов можно проводить методом интерференционной микроскопии, которая позволяет измерять оптическую разность хода (ОРХ), или методом сдвиговой интерферометрии, с помощью которой можно визуализировать и измерять производную по направлению от ОРХ (метод дифференциально-интерференционного контраста).

Для формирования объектного и опорного пучков в интерференционной микроскопии обычно использовались двулучевые схемы интерферометров Майкельсона и Маха-Цендера [6]. Современная тенденция в интерференционной микроскопии – это переход к некогерентному свету, что позволяет существенно уменьшить характерные для когерентного излучения шумы (спекл-шум и т.п.). Применение источников излучения с малой длиной когерентности ведет к необходимости использования схем интерферометров с совмещенными объектной и опорной ветвями. Ниже на примере работ по микроскопии рассмотрены три основные схемы формирования опорного пучка из объектного.

В работе [7] используют дифракционную решетку, помещенную в выходную плоскость коммерческого микроскопа, и $4f$ оптическую систему. Излучение нулевого порядка дифракции пропускают через амплитудный фильтр пространственных частот (pinhole) и формируют из него опорный пучок. В результате формируются интерферограммы в полосах конечной ширины, при расшифровке которых можно применять только алгоритм Фурье, недостатки которого будут приведены ниже.

В работе [8] также используется некогерентное излучение и $4f$ оптическая система. Однако в этой работе излучение после первого фурье-объектива направляется на фазовый пространственный фильтр, установленный в общей фокальной плоскости $4f$ оптической системы. Фильтр выполнен в виде чисто фазового пространственно-временного модулятора света, управляемого от компьютера, который сдвигает фазу нерассеянного излучения, сфокусированного вблизи оптической оси, т.е. он работает как переменный фазовый фильтр Цернике. Полученную интерферограмму можно также рассматривать как голограмму Габора. Для расшифровки интерферограммы используется четыре изображения со сдвигом фазы на $\pi/2$. Основным недостатком данного метода интерференционной микроскопии заключается в использовании дорогостоящего фазового пространственно-временного цифрового модулятора света.

В работе [9] для формирования опорного пучка применяют светоделительный кубик и точечную диафрагму, установленную в фокальной плоскости первого фурье-объектива $4f$ оптической системы. Недостаток данного метода интерференционной микроскопии состоит в том, что он основан на внеосевой (off-axis) интерферометрии, т.е. на выходе формируется интерференционное изображение микрообъекта в полосах конечной ширины. Для автоматической расшифровки интерферограмм и вычисления двумерного распределения оптической разности хода излучения используется алгоритм, основанный на применении двумерного преобразования Фурье к полученному изображению [10]. Однако метод Фурье ограничен по классу исследуемых объектов. Так, объекты с большими градиентами показателя преломления или перепадами высоты не восстанавливаются данным методом. Еще один недостаток метода Фурье связан с перекрытием спектров нулевого и более высоких порядков, а также с краевыми дифракционными эффектами.

Во всех перечисленных выше методах используется пространственная фильтрация излучения с помощью точечной диафрагмы (pinhole) для формирования опорного пучка из объектного. Технически реализовать такую процедуру очень сложно. Для получения опорного пучка необходимо применять диафрагму диаметром около 20 мкм, что вызывает трудности в юстировке и ведет к ослаблению интенсивности опорного пучка. Если же микроскоп работает в томографическом режиме, то применение точечной диафрагмы невозможно, т.к. при наклонном освещении объекта пучок в фокальной плоскости фурье-объектива будет постоянно перемещаться.

Поэтому в настоящей работе мы решили отказаться от точечной диафрагмы и использовать технику сдвиговой интерферометрии в варианте со светоделителем. Такой выбор дополнительно обусловлен тем, что мы используем интерференционный микроскоп и для томографических исследований живых клеток. Основной недостаток сдвиговой интерферометрии состоит в невозможности получения фазового изображения, точнее, двумерной карты ОРХ, т.к. этим методом можно измерять только производную по направлению сдвига от ОРХ. Однако, известно [11], что томограммы можно реконструировать и по производным от проекций. Поэтому при томографическом режиме работы микроскопа подходит вариант сдвиговой интерферометрии для регистрации проекционных данных.

Оптическая схема сдвигового интерференционного микроскопа с автоматической расшифровкой интерферограмм методом фазовых шагов, разработанного в данной работе, представлена на рис. 1.

В качестве источника низкокогерентного излучения используется точечный светодиод фирмы Kyosemi Co., Япония, модель KED080RAXH, центральная длина волны излучения 652 нм, полуширина спектра излучения 10 нм, мощность излучения 0.6 мВт при токе 25 мА.

В отличие от обычного точечный светодиод имеет небольшую площадку излучения (около 80 мкм), излучающую строго в одном направлении (рис. 2). Использование такого источника совместно с коллимирующим объективом (фокусное расстояние 12 мм) позволяет без потери мощности получить излучение, имеющее высокую пространственную когерентность, но при этом не лазерное, которое обладает, как известно, большими оптическими шумами.

Микроскоп построен по схеме сдвигового интерферометра общего пути. Зеркала M2, M3 находятся в задней фокальной плоскости фурье-объектива F1, поэтому малый наклон зеркала M2 приводит только к поперечному сдвигу пучков после второго фурье-объектива F2, без их взаимного наклона. Следовательно, в такой схеме интерферометр настроен на бесконечно широкую полосу. Для восстановления фазовых изображений используется метод фазовых шагов, который вносится смещением зеркала M3 с помощью пьезопривода вдоль направления оптической оси. Величина фазовых шагов рассчитывается по алгоритму, предложенному в нашей работе [12].

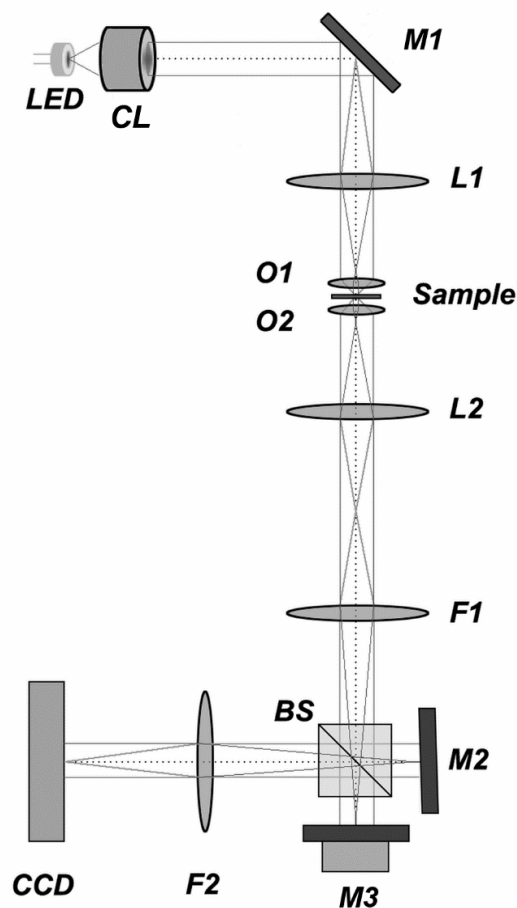


Рис. 1. Схема сдвигового интерференционного микроскопа:
 LED – точечный светодиод; CL – коллимирующий объектив; M1, M2 – зеркала; L1, L2 – линзы;
 O1, O2 – микрообъективы; F1, F2 – фурие-объективы; BS – светоделительный кубик;
 M3 – зеркало на пьезоприводе; CCD – ПЗС-камера

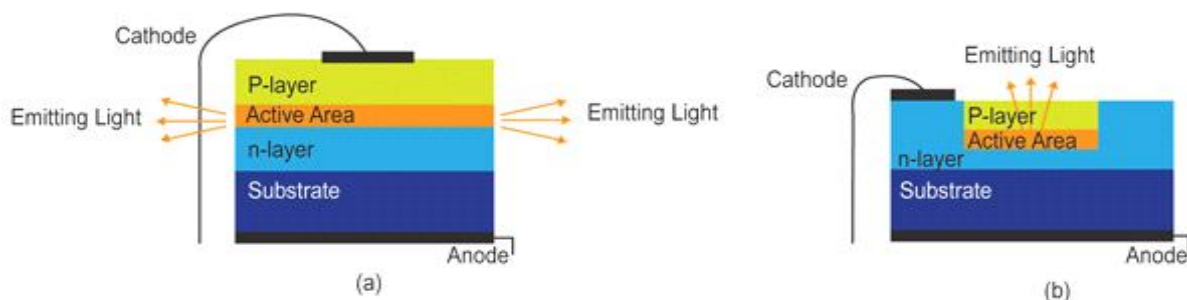


Рис. 2. Сравнение обычного (а) и точечного (б) светодиодов

Пример сдвиговых интерферограмм эритроцита с различными фазовыми шагами приведен на рис. 3, а, а восстановленное фазовое изображение производной ОРХ излучения, прошедшего через эритроцит – на рис. 3, б.

Томографический режим работы интерференционного микроскопа достигается за счет углового сканирования зеркала M1 вокруг оси, перпендикулярной плоскости рис. 1. На рис. 4 показаны сечения и 3D томограмма эритроцита, реконструированные по 119 экспериментальным проекциям в угловом диапазоне от минус 60° до плюс 58°, использовался итерационный алгебраический ART алгоритм, выполнено 11 итераций.

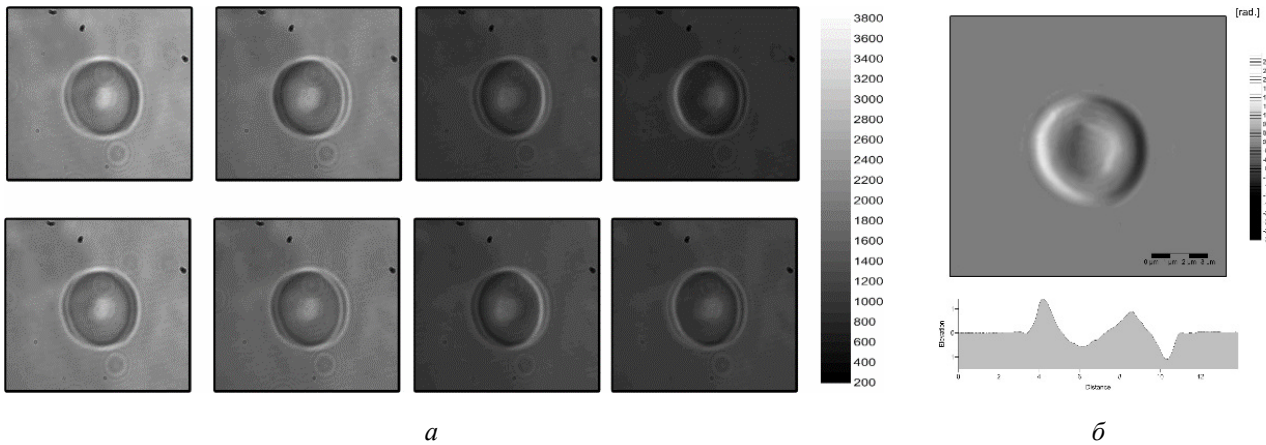


Рис. 3. Сдвиговые интерферограммы эритроцита, сдвиг в горизонтальном направлении (а);
восстановленное фазовое изображение производной ОРХ излучения, прошедшего через эритроцит (б)

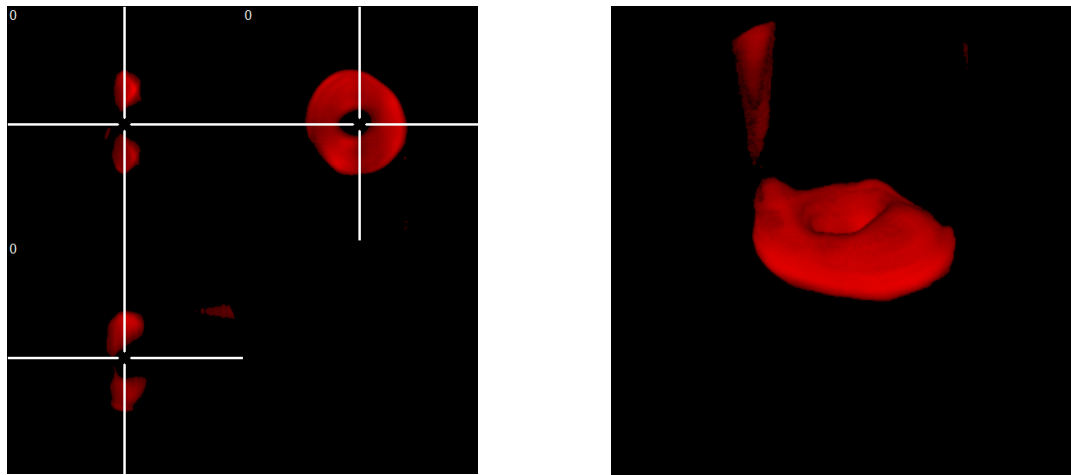


Рис. 4. Сечения $X = 0$, $Y = 0$, $Z = 0$ и 3D томограмма эритроцита

В заключении авторы выражают благодарность Пикалову В.В. за реконструкцию томограмм, а Латушко М.И. за помощь в регистрации проекций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. – М.; Мир, 1982.
2. *Bennett A., Osterberg H, Jupnik H. and Richards O.* Phase Microscopy: Principles and Applications, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1951.
3. *Hariharan P.* Optical Interferometry, 2nd ed, Academic Press, 2003.
4. *Murphy D.* Differential interference contrast (DIC) microscopy and modulation contrast microscopy, in *Fundamentals of Light Microscopy and Digital Imaging*, Wiley-Liss, New York, 2001.
5. *Роскин Г.И.* Микроскопическая техника. – М.: Изд. «Советская наука», 1946.
6. *Захарьевский А.Н., Кузнецова А.Ф.* Интерференционные биологические микроскопы. Цитология, 1961.
7. *Bhaduri B. et al.* Diffraction phase microscopy with white light // *Optics Letters*. – 2012. – Vol.37. – No. 6. – P. 1094-1096.
8. *Wang Z. et al.* Spatial light interference microscopy (SLIM) // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – No. 2. – P. 1016-1028.

СВЕТОСИЛЬНЫЕ ВОГНУТЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ С ПЛОСКИМ ПОЛЕМ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

*Белокопытов А.А., Лукин А.В., Максакова Л.А., Муслимов Э.Р.,
Саттаров Ф.А., Шигапова Н.М.*

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

ОАО «НПО ГИПО» более 10 лет плодотворно сотрудничает с компанией JETI Technische Instrumente GmbH (Германия) в области расчета оптических схем спектральных приборов, схем записи голограммных дифракционных решеток, изготовления оптической элементной базы: дифракционных решеток, зеркал, микрообъективов, оптических покрытий.

Компания JETI серийно выпускает разработанные совместно с ОАО «НПО ГИПО» миниатюрные встраиваемые спектрометры с плоским полем серий SDC-BB и Ru60 (рис. 1, 2), в качестве диспергирующих элементов в которых применены светосильные вогнутые голограммные дифракционные решетки с плоским полем производства ОАО «НПО ГИПО».

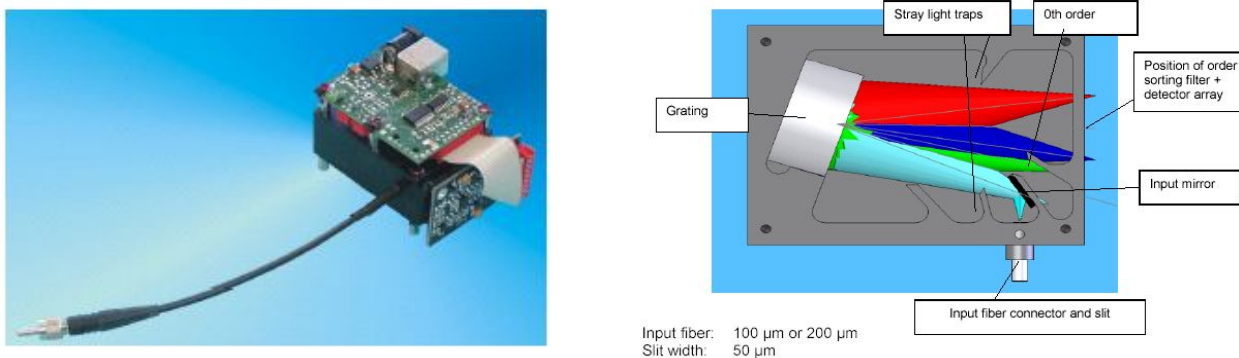


Рис. 1. Внешний вид и оптическая схема спектрометра SDC-BB.

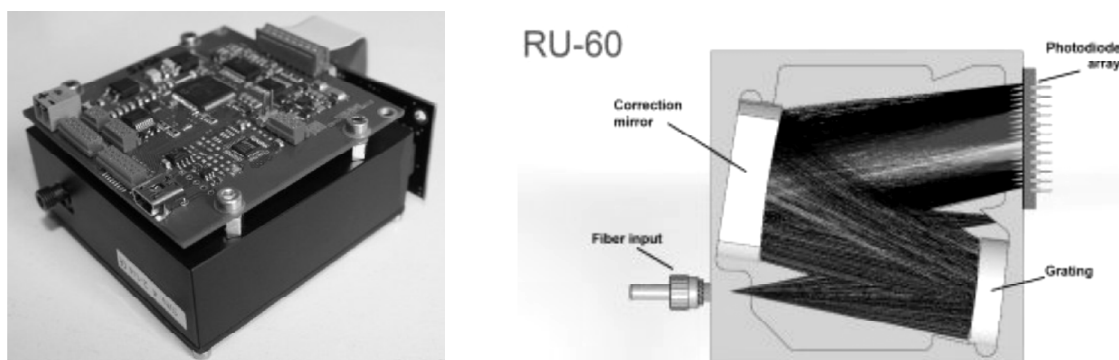


Рис. 2. Внешний вид и оптическая схема спектрометра Ru60

Области применения малогабаритных спектрометров:

– мобильное оборудование для проведения спектрометрических измерений: колориметры, спектрорадиометры, аналитические приборы, многоканальные спектрометрические системы, датчики;

– материаловедение (химическая промышленность, металлургия, в т.ч. анализ драгоценных металлов, добывающая и нефтеперерабатывающая промышленность);

- технологический контроль в машиностроении и приборостроении;
- пищевая промышленность;
- медицина (анализ медикаментов, препаратов крови, мочи, спортивная медицина);
- экологический контроль;
- научные исследования.

Приборы серий SDC-BB и Ru60 имеют оптоволоконный вход для ввода излучения, в качестве диспергирующего элемента применены вогнутые голограммные дифракционные решетки с скомпенсированными абберациями, для регистрации сигнала используются многоканальные фотоприемники – фотодиодные линейки и матрицы, передача данных в компьютер осуществляется посредством порта USB2.0, приборы оснащены специализированным программным обеспечением.

Оптические схемы приборов с использованием светосильных вогнутых голограммных дифракционных решеток позволяют минимизировать массогабаритные характеристики (например, оптический блок SDC-BB по габаритам идентичен обычной спичечной коробке) и обеспечивают высокое качество регистрации сигналов (FWHM 2,5-6 нм в зависимости от модификации во всем рабочем диапазоне длин волн) в широком спектральном диапазоне 200-1000 нм.

При расчете схем записи решеток применяется метод, основанный на минимизации отдельных членов разложения функции оптического пути вогнутой неклассической дифракционной решетки [1, 2].

Решетки для этих спектрометров записываются двумя сферическими фронтами в разработанной ОАО «НПО ГИПО» специализированной голографической установке с использованием He-Cd лазера (рис. 3).

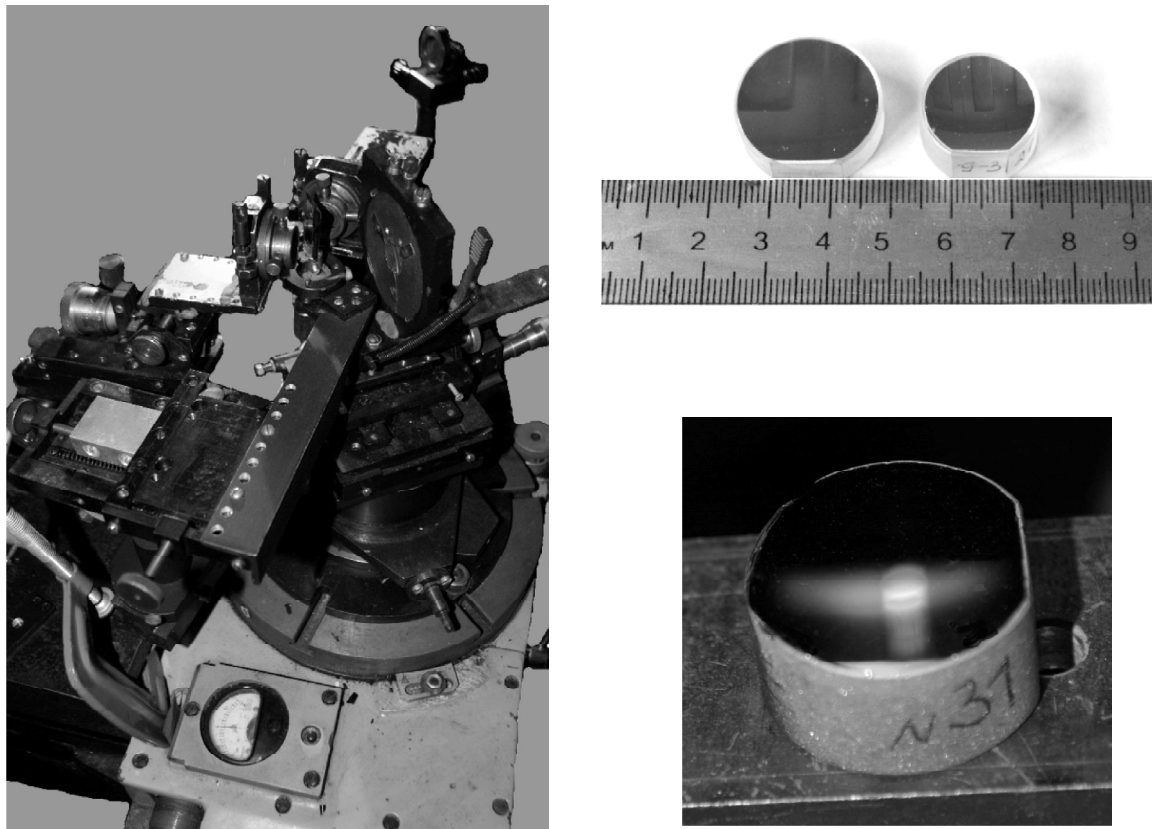


Рис. 3. Голографическая установка для записи светосильных дифракционных решеток с плоским полем и их внешний вид

Установка состоит из поворотного стола с точностью отсчета углов до 6", светоделителя, набора микрообъективов и точечных диафрагм (пинхоллов) для пространственной фильтрации сферических пучков, поворотных зеркал, крепления подложки решетки и набора механических узлов, обеспечивающих угловые и линейные перемещения оптических элементов схемы записи. Копирование решеток осуществляется по стандартной технологии.

На рис. 4 представлены образцы спектров, зарегистрированных с помощью спектрометра SDC-BB.

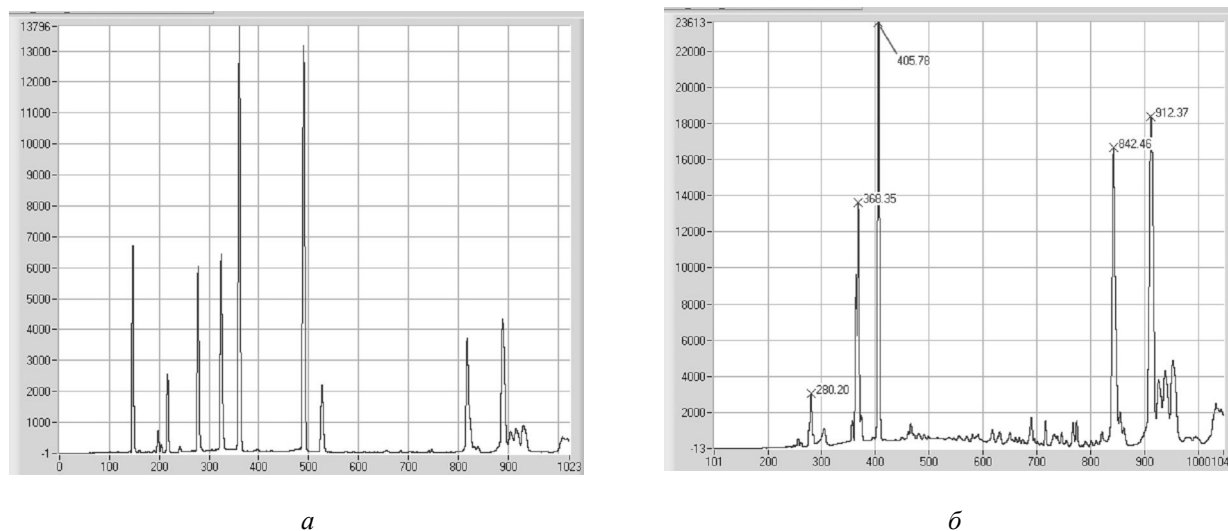


Рис. 4. Образцы эмиссионных спектров излучения шариковых ламп, полученных с помощью спектрометра SDC-BB: а – спектр ртути; б – спектр свинца

Контроль качества решеток осуществляется по: геометрическим размерам, наклону штрихов относительно базовой плоскости, дифракционной эффективности, разрешению, уровню рассеянного света, наличию визуальных дефектов. В совокупности этот комплекс мер аттестационного контроля обеспечивает высокую степень идентичности решеток и позволяет устанавливать готовые решетки в приборы с минимальным набором юстировочных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. – Казань: Изд-во Казан. гос. тех. ун-та. 2003. – 197 с.
2. Павлычева Н.К. Применение неклассических дифракционных решеток в оптических схемах спектрографов с плоской поверхностью изображения: Дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Казань, 1980. – 165 с.

FAST CONCAVE HOLOGRAPHIC FLAT-FIELD GRATINGS FOR SMALL-SIZED SPECTROMETERS

Belokopytov A.A., Lukin A.V., Maksakova L.A., Muslimov E.R., Sattarov F.A.
(OJSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan)

The paper reviews a holographic facility designed to record fast concave holographic flat-field gratings, also it examines some certification problems concerning such gratings and their applications in small-sized spectrometers, manufactured by JETI Technische Instrumente GmbH (Germany).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА ПО СХЕМЕ ГОИ

Шевцов М.К.¹, Корешев С.Н.²

(¹ОАО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»;

*²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург)*

Сообщается об исследовании сторонними предприятиями лабораторного макета и опытного образца голографического коллиматорного прицела, построенных по схеме АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» (Патент РФ № 135426). Лабораторный макет был изготовлен АО «Швабе – оборона и защита». Опытный образец прицела (см. рис. 1) был разработан и изготовлен специалистами Ростовского оптико-механического завода.



Рис. 1. Внешний вид опытного образца прицела РОМЗ

В нем использованы оригинальные решения как в механической конструкции, так и в электронной системе управления, позволяющие производить настройку и выверку прицела. Исследования макета и опытного образца проводились АО «Швабе – оборона и защита» и ЦНИИ Машиностроения, соответственно. Полученные данные подтвердили полное соответствие параметров прицела техническому заданию в диапазоне рабочих температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обсуждаются представленные АО «Швабе – оборона и защита» результаты сравнительного исследования голографического прицела КМЗ и прицела по схеме ГОИ.

RESEARCH PROTOTYPES OF HOLOGRAPHIC SIGHT SCHEME GOI

Shevtsov M.K.¹, Koreshev S.N.²

(¹ОАО «State Optical Institute. Vavilov», St. Petersburg;

² University ITMO, Saint-Petersburg)

СЕКЦИЯ 3

**ИЗОБРАЗИТЕЛЬНАЯ 3D ГОЛОГРАФИЯ
И ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ**

SECTION 3

**GRAPHIC 3D HOLOGRAPHY
AND PHOTOCSENSITIVE MATERIALS
FOR HOLOGRAPHY**

SINGLE-BEAM DENISYUK HOLOGRAMS RECORDING WITH PULSED 30HZ RGB LASER

Zacharovas S.¹, Bakanas R.^{1,2}, Stankauskas A.¹

(¹ Geola Digital LAB, Vilnius, Lithuania;

*² Department of Materials Engineering, Kaunas University of Technology,
Kaunas, Lithuania)*

Abstract

It is well known fact that holograms can be recorded either by continuous wave (CW) laser, or by single pulse coming from pulsed laser. However, multi-pulse or multiple-exposure holograms were used only in interferometry as well as for information storage. We have used Geola's single longitudinal mode pulsed RGB laser to record Denisyuk type holograms. We successfully recorded objects situated at the distance of more than 30cm, employing the multi-pulse working regime of the laser. To record Denisyuk hologram we have used 50 ns duration 440, 660 nm wavelength and 35ns duration 532 nm wavelength laser pulses at the repetition rate of 30 Hz. As photosensitive medium we have used Slavich-Geola PFG-03C glass photoplate. Radiations with different wavelengths were mixed into «white» beam, collimated and directed onto the photoplate. For further objects illumination an additional flat silver coated mirror was used.

Key words: Denisyuk; Hologram; Multi-pulse exposure; PFG-03C; GEO-03.

1. Introduction

In the 1959 Yuri Denisyuk has invented the method for reflection hologram recording on a transparent photosensitive holographic material [1, 2]. At that time, Denisyuk used mercury lamp which had only about millimeter of coherence length. With the invention of continuous wave (CW) HeNe, Ar⁺ lasers, there was huge increase in holograms deepness and clarity, but process of hologram recording by using continuous wave lasers requires very stable environment which leads to a huge amount of unsatisfying quality hologram recordings. Solid state, Q-Switched, single longitudinal mode pulsed lasers can accumulate and release all the energy needed to record hologram in a few tenths of nanosecond period pulse (giant pulse), CW lasers would generate equal amount of energy within minutes. Pulsed laser largely reduces probability that environmental vibration would create negative effects on hologram during laser exposure. However, pulsed lasers can be made emitting only certain wavelengths at Single Longitudinal Mode (SLM) with a sufficient energy – i.e. up until now there is no SLM laser emitting more than several miliJoules per pulse in Red and Blue light regions suitable for hologram recording with acceptable white colour balance replay.

So, we wanted to investigate if it would be possible to record good quality Denisyuk hologram with relatively low energy pulsed laser allowing it to expose a photosensitive material with sequence of pulses. For that task we have employed one of Geola's laser from series of pulsed SLM lasers emitting radiation pulses at three visible spectrum wavelengths: blue – 440 nm, green – 532 nm and 660nm in the red spectrum. In the present article we are reporting experimental results of Denisyuk

hologram recording in PFG-03C photoemulsion coated on glass plate by simultaneous object exposition to 440 nm, 532 nm, 660 nm wavelengths laser pulses. The first attempt to perform such an experiment was done in 2004 by D. Ratcliffe and H. Bjelkhagen – we’ve found out about their work only after finishing our experiments, but their results were never published [3].

It would seem obvious that if one pulse of the pulsed laser records a small hologram (as in Geola’s digital holographic printers [4]), the sequence of said pulses also can be used for the successful bigger hologram recording. However it is not so obvious – to sum effectively all the energies of each laser radiation pulse, all said pulses shall be of the same frequency with as low variations as possible. Also, the objects to be recorded on a hologram, photoplate, all optics and the laser itself, also probably shall be very stable and do not move at all between the exposures performed by different pulses.

In the work presented below we have qualitatively investigated the suitability of our pulsed RGB lasers for hologram recording in multi-pulse regime in vibrationally harsh environment.

2. Geola’s RGB Pulsed Laser for Holographic Applications

From 1998 Geola has run a major research programme targeting laser sources applicable to pulsed holography. When we have started this program no commercial pulsed blue lasers were available with characteristics suitable for the needs of holography – i.e. having a nice beam shape, stability and sufficient coherence length. In addition the only real red source – the ruby laser – produced too deep a red emission at 694nm. Over the years since 1998 we have made significant progress in realizing RGB pulsed laser solutions for holography. These lasers now largely fulfill the needs of imaging holography.

For the recording of colour Denisyuk hologram we have used Geola’s commercial RGB-ALFA laser. The laser has two master oscillator channels with the Nd:YAG crystal as an active medium (Fig. 1). Figure 2 shows diagram of energy levels of primary and secondary transitions of the Nd³⁺ ion in YAG crystals employed in our laser. First oscillator uses the ⁴F_{3/2} to ⁴I_{11/2} transition of a Nd:YAG crystal which generates laser radiation at 1064nm wavelength which is then upconverted to second harmonics laser pulse of 532nm wavelength.

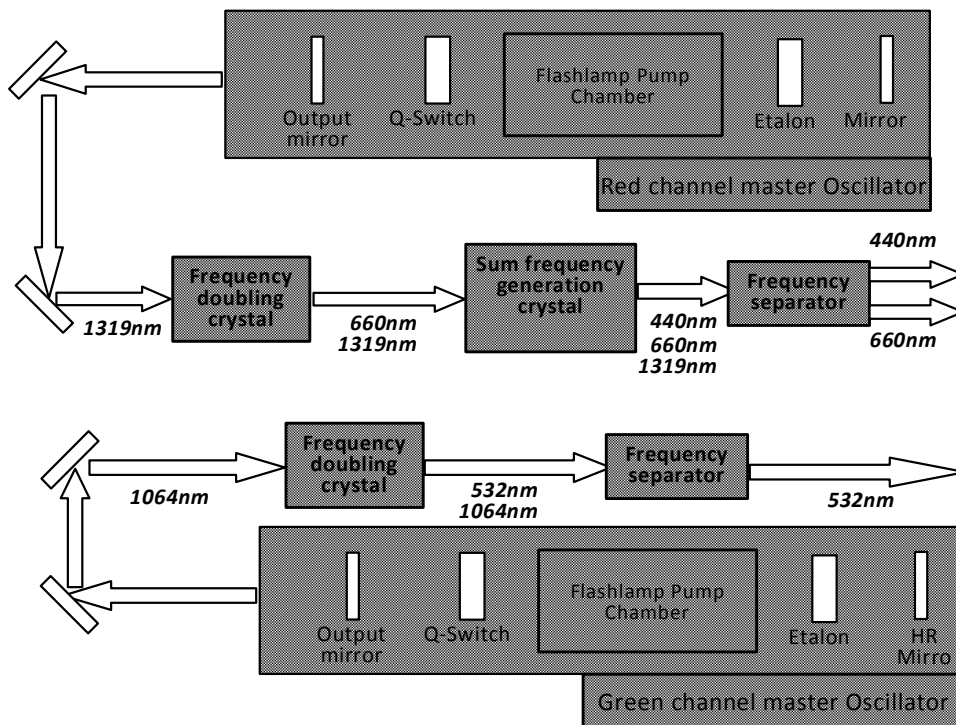


Fig. 1. Schematic of RGB-Alpha – pulsed SLM laser manufactured by Geola for holography applications

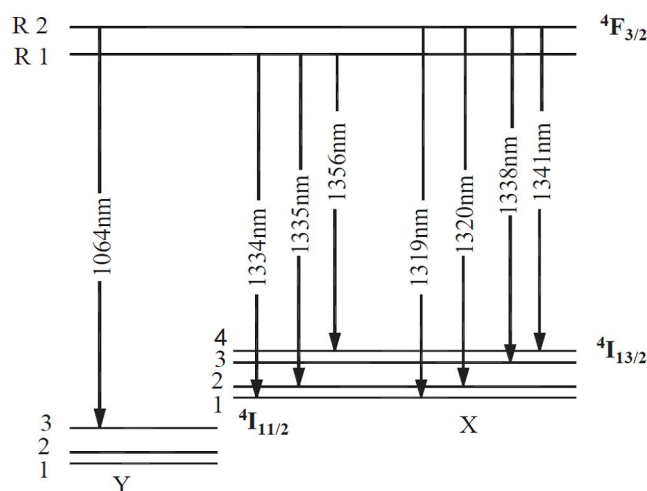


Fig. 2. Diagram of energy levels of primary and secondary transitions of the Nd³⁺ ion in YAG crystals

Second oscillator uses Nd:YAG $4F_{3/2}$ to $4I_{13/2}$ transition, which generates 1319 nm wavelength laser radiation. Fundamental 1319 nm wavelength radiation (pulse duration $\tau \sim 60$ ns) is converted to the second harmonic at 660 nm by an LBO crystal (using non-critical phase matching).

The third harmonic at 440 nm is generated by utilisation of an additional extra-cavity LBO non-linear crystal. The 440 nm line generation is a two-step process involving two harmonic generators. In the first LBO crystal some fraction of 1319 nm fundamental radiation is converted to the second harmonic at 660 nm. In the second LBO crystal radiation at 1319 nm is mixed with the second harmonic to produce the third harmonic at 440 nm.

The laser is a flash-lamp pumped system with a repetition rate of 30 Hz. This repetition rate was adopted to match the refresh rate of a particular LCD micro-display. Higher repetition rates are also available. The output energy of the blue harmonic is in the region of 2 mJ, red 3 mJ and green 6 mJ, which at 30 Hz pulse repetition rate corresponds to 60 mW, 90 mW and 180 mW CW laser power. RGB-ALFA laser output stability is ± 2 % RMS, and the coherence length is > 2.5 m. To improve long term stability, the laser has an active cavity stabilization system, allowing it to work 24 hours, 7 days a week with a stable transversal and longitudinal mode.

3. Methods and materials

As photosensitive medium we have used Slavich PFG-03C silver halide photoemulsion deposited on the 102 x 127 mm glass plate. PFG-03C is an ultra-fine grain emulsion. Due to the very small grain size (average grain size 10 nm) emulsion less sensitive than fine grain emulsions.

A spectral sensitivity curve of the PFG-03C material is shown in Fig. 3. Diffraction efficiency versus exposure is shown in Fig. 5. The maximum diffraction efficiency in the blue region (not shown) is > 25 % and in the green and red regions > 45 %.

Typical sensitivity values for PFG-03C with CW laser exposure are 2 mJ/cm² and 3 mJ/cm² for the blue and red/green regions respectively. The grain size distribution curve for both PFG-03C is shown on Fig. 4. Diffraction efficiency – on Fig. 5.

For the exposed photoplates processing we have used the formulas developed by Hans Bjelkhagen and Nick Phillips [1] and adjusted to pulsed exposure of PFG-03C photomaterials by Geola group chemists [2]. The processing scheme and used chemicals recipes are summarized in the Tables 1 and 2 below.

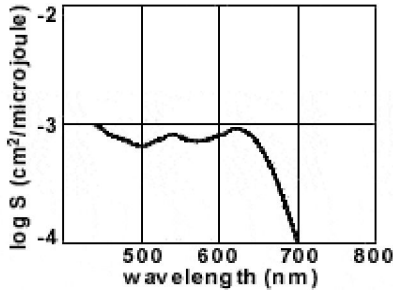


Fig. 3. Spectral sensitivity

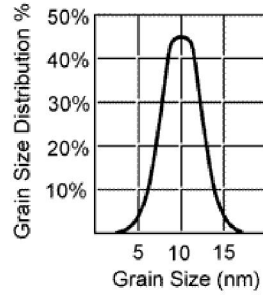


Fig. 4. Grain size distribution

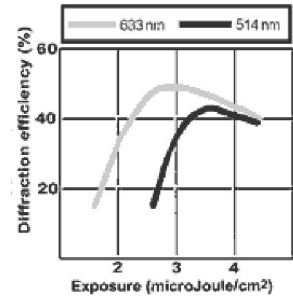


Fig. 5. Diffraction efficiency

PFG-03C Chemical processing scheme

Table 1

Exposure:	0.075...0.2 mJ/cm ² ,
Development/Hardening	SM-6 + 10 ml of 37% Formaldehyde for 1 liter of developer), 2min
Wash	Water, 2min
Bleach	PBU-Amidol, 5 min
Wash	Water, 5 min.
Drying in Alcohol bath	50% Isopropyl alcohol, 4min
Drying	Slow Air

Recipes for the employed developer and bleach

Table 2

SM-6 Developer		PBU-Amidol bleach	
Sodium Hydroxide (NaOH)	12.0g	Potassium Persulphate (K ₂ S ₂ O ₈)	10.0g
Phenidone (C ₆ H ₅ -C ₃ H ₅ N ₂ O)	6.0g	Citric Acid (C ₆ H ₈ O ₇)	50.0g
Ascorbic Acid (C ₆ H ₈ O ₆)	18.0g	Cupric Bromide (CuBr ₂)	1.0g
Sodium Phosphate dibasic (Na ₂ HPO ₄) or Sodium Phosphate dodecahydrate (Na ₂ HPO ₄)•12H ₂ O	28.4g 71.6g	Potassium Bromide (KBr)	20.0g
Water to make	1000cm ³	Amidol ((NH ₂) ₂ C ₆ H ₃ OH•2HCl)	1.0g
		Water to make	1000cm ³

For Denisjuk hologram recording we have combined 440 nm, 532 nm, 660 nm wavelength laser pulses to one «white light» laser radiation beam using a standard three dielectric mirrors beam combiner – Fig. 6.

Before combining, each wavelength beam was passing an attenuator, where we were able to adjust its intensity. After the combiner, «white light» laser radiation beam was expanded and collimated with a telescope constructed from a lens and spherical mirror. Expanded laser radiation beam was directed onto photoplate. The exposure time control was performed with a computer controlled shutter.

with cars and lorries movement. Optical breadboard was without active vibration isolation system, just simple 200mm optical honeycomb placed on metal supports via 3cm rubber legs. Experiments were performed at day time.

As the plate holder we have used a usual photographic frame with removed top part. The frame was mounted on the standard pole. The four objects numbered as 1, 2, 3 and 4 were placed at the corresponding distances of 1.5cm, 3cm, 21cm and 40cm. Fifth object – an aluminium plate was placed between objects 2 and 3.

4. Results

We have successfully recorded more than 20 holograms on the photoplates in size of 102x127 mm (4x5"). After inserting the plate into the holder we allowed it to settle for 1 minute and then the shutter was opened and plate exposed. One of such holograms is shown at Fig. 7. As you can see, all four numbered and one unnumbered objects are clearly visible on the hologram, even the object 4, situated at the distance of 40cm from the photoplate. Quite frankly, we were surprised how insensitive for vibrations our setup occurred.

We think the setup's insensitivity to the vibration when photomaterial is exposed by the sequence of pulsed laser energy pulses, is caused by the silver-halide photomaterial penetration through very high and instantaneous material exposure. Having very high instantaneous exposures, each laser pulse, even weak in energy, much more rapidly forms reliable latent image. Due to this fact, the Reciprocity law differs from CW exposures on any holographic material tested in our laboratory (Schwarzschild effect), photopolymer including. Of course, each laser's energy pulse shall have the same wavelength and same phase, which luckily is the case with our RGB-ALPHA laser – at least for the duration of a few seconds, needed for photomaterial exposure.

By varying energies in each colour laser radiation we have determined that in order to obtain the best white colour perception (hologram illuminated by Osram Decostar 51 Titan SP, 12V, 50W halogen bulb) of the reconstructed Denisyuk hologram image for the human eye, Red, Green and Blue laser pulse energy ratio should be as shown in the table 3. Those energies were achieved by exposing the plate for 4 seconds – i.e. we have successfully recorded a Denisyuk hologram with the sequence of 120 pulses.

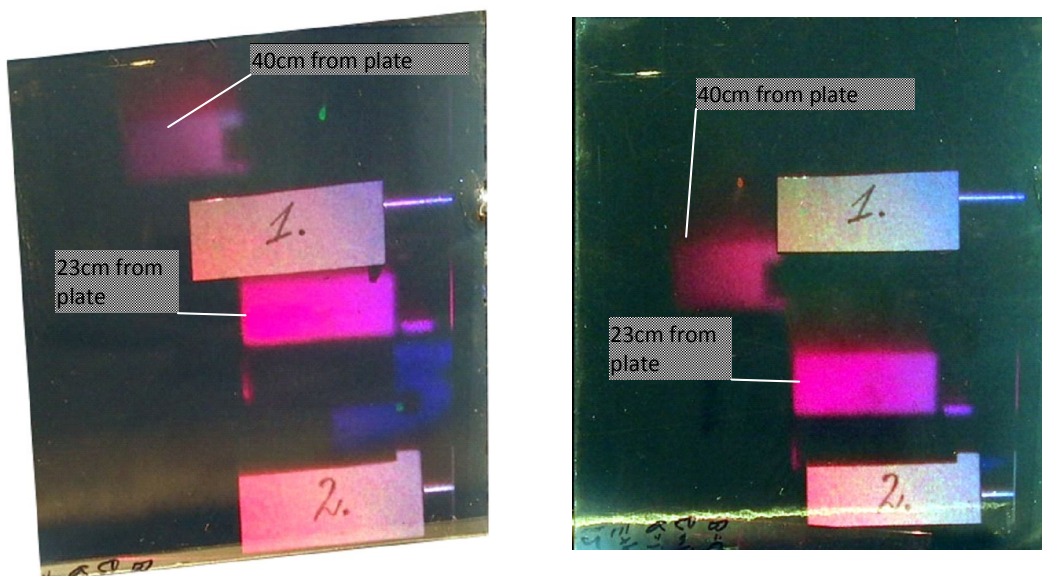


Fig. 7. Photograph of different views of the Denisyuk hologram recorded with series of 120 pulses from Geola's pulsed RGB laser

Table 3

Total energy exposure values for the best white colour perception

Wavelength, nm	Pulse duration, ns	Exposure energy, $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	Pike pulse exposure power, W/cm^2
440	50	75	1.25
532	35	200	4.76
660	50	190	3.17

Of course, use of the energy values mentioned in the Table 3 is not mandatory. Those energies were good for the particular batch of PFG-03C plates we used in our experiments and may be a bit different for other batches. However, the main tendency is clear – while multi-exposing PFG-03C (and GEO-03) plates with «white light» laser beam, one shall keep Red and Green beams energies approximately equal to each other and the Blue beam energy shall be significantly lower.

5. Conclusions

- We have recorded a true-color Denisyuk hologram with a sequence of laser energy pulses each of which were distanced from each other for 33ms and were creating the pike radiation energy density on the material of R/G/B colors respectively: 3.17/4.76/1.25W/cm².
- The recorded color hologram size was 127x127mm, image depth was up to 40cm. Resulting hologram showed no image blur, nor vibrational interference rings or any other visible artifacts.
- Photomaterial exposure with sequence of laser energy pulses has big advantage versus CW exposure in creating a good quality color hologram. The main advantage lies in very high and instantaneous material exposure.
- During the multi-pulse exposure of a photomaterial, each laser energy pulse shall have same wavelength and same phase, which luckily is the case with our RGB-ALPHA laser – at least for the duration of a few seconds needed for photomaterial exposure.
- RGB-ALFA pulsed holography lasers can be successfully employed not only in digital holography, but also in classic analogue color holography, for recording true-color deep Denisyuk holograms with multi-pulse exposures.

REFERENCES

1. 1959 *Staselko D.I.*, ‘Yurij Nikolayevitch Denisyuk – founder of three-dimensional optical holography. How it happened. For 50th jubilee of optical phenomena’s discovery’ (in Russian). <http://3d-holography.ru/denisukdiary>
2. *Johnston, S.F.*, ‘Yuri Denisyuk: an appreciation’. In: Bjelkhagen, H.I. (ed.) *Advances in Display Holography: Proceedings of the 7th International Symposium on Display Holography (ISDH)*, St Asaph, Wales, 10-14 July 2006. River Valley Press, St Asaph, Wales, pp. 8-13. (2006) ISBN 9780955352713
3. Private conversation with David Brotherton-Ratcliffe and correspondence with Hans Bjelkhagen at hansholo@aol.com in August 2015.
4. *Brotherton-Ratcliffe, Zacharovas S., Bakanas R., Pileckas J., Nikolskij A., Kuchin J.* Digital Holographic Printing using Pulsed RGB Lasers, SPIE «Optical Engineering», special edition on digital holography, *Opt. Eng.* 50, 091307 (2011) ; doi:10.1117/1.3596182 (9 pages).
5. *Bjelkhagen H.I.* Silver Halide Recording Materials for Holography and Their Processing, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 66 Springer-Verlag, Heidelberg, New York, 1993.
6. *Zacharovas S.* Colour Ultra-fine grain photomaterials for holography. <http://materials.geola.lt/index.php/holomaterials/color>, accessed at 2015.09.14.

СВЕТОДИОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОНОХРОМНЫХ ГОЛОГРАММ И ОПТОКЛОНОВ

Алкис Лембессис¹, Шевцов М.К.²

(¹Греческий институт голографии, Афины, Греция;

²ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия)

Процесс восстановления голограмм является настолько же важным, как и процесс записи. Только в том случае, когда свойства опорного и восстанавливающего пучка идентичны (пространственное распределение, расходимость, угол падения, длина волны), восстанавливается изображение, свободное от искажений.

Наиболее важным свойством любого используемого для восстановления голограмм источника света является пространственная когерентность. Отсутствие пространственной когерентности в восстанавливающем пучке ведёт к размытию изображения и ограничивает резкость изображения по глубине голограммы.

В представленной работе мы показываем, что использование нашего нового источника **HiH-fire** на основе светодиодов оптимизирует восстановление обычных монохромных голограмм по сравнению с традиционными галогенными источниками; в то же время использование светодиодного освещения имеет экономические и практические преимущества по сравнению с галогенным, особенно при использовании в течение длительного времени, например, на выставках.

С другой стороны многочисленные приложения цветной голографии и ОптоКлонов® требуют, чтобы восстановление голограмм обеспечивало получение ультра-реалистичного изображения. Особое значение приобретает пространственная когерентность при восстановлении глубоких объёмных изображений произведений искусства.

В нашей презентации мы продемонстрируем, что разработанный нами новый источник **RGB-HoloFoS** позволяет уменьшить размытие изображения, связанное с размерами источника, а также улучшить цветовой баланс и контраст изображения.

LED ILLUMINANTS FOR OPTIMAL VIEWING OF MONOCHROMATIC HOLOGRAMS AND OPTOCLONES

Lembessis A.¹, Shevtsov M.K.²

(¹Hellenic Institute of Holography, Athens, Greece;

²ОАО «State Optical Institute. Vavilov», St. Petersburg)

The illumination of holograms is as important as the techniques to record holograms. Only if the properties of the reference and replay lights are identical (spatial coherence, ray divergence, angle of incidence and wavelength) will a distortion-free, correct holographic image be generated.

One of the most important properties of any light source used to illuminate a hologram is spatial coherence. A finite spatial coherence in the reconstruction source leads to source-size blurring, which limits the clear image depth of the hologram.

In our presentation, we will demonstrate that the use of our newly developed LED-based **HiH-fire** illuminants optimizes the viewing of conventional monochromatic display holograms over traditionally used halogen lamps; at the same time, the use of LED illumination is associated with several other

economic and practical advantages as compared to halogen lights, equally important over an extended in time exposure such as exhibitions.

On the other hand, many applications of colour holography and OptoClones® require that the display and illumination techniques are carefully considered to display an ultra-realistic image. Spatial coherence assumes particular importance when it comes to the illumination of deep 3D objects such as cultural artifacts.

In our presentation, we will demonstrate that the use of our newly developed RGB-LED **HoLoFoS(λ)** illuminants makes it possible to reduce the image source-size blurring as well as to improve colour rendering and image contrast.

О ВЫБОРЕ СРЕДНЕЙ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ В ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОМ НОСИТЕЛЕ НА БАЗЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Настас Андриан Михайлович, Иову М.С.

*(Институт прикладной физики, Академия наук Молдовы,
г. Кишинев, Республика Молдова)*

Для получения различных голографических дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и при записи голограмм при использовании фототермопластического носителя (ФТПН) частоту записи и среднюю несущую частоту выбирают равной резонансной частоте ФТПН. Передача пространственных частот в окрестности резонансной частоты осуществляется выстраиванием лунок в один ряд на поверхности ФТПН в эквидистантно расположенные параллельные линии (рис. 1). Однако свет рассеивается на каждой отдельной лунке и образуется интерференционное шумовое гало, максимум интенсивности которого совпадает с пространственной резонансной частотой. Последний факт приводит к снижению контраста изображения и уменьшению отношения сигнал/шум при записи решеток на резонансной частоте и при записи голограмм со средней несущей частотой равной резонансной.

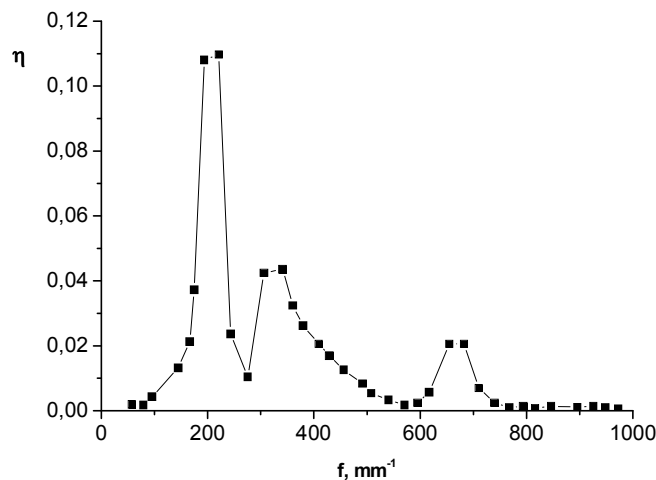


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности η от пространственной частоты f голографической дифракционной решетки

Цель данной работы состояла в поиске оптимальной частоты при записи решеток и средней несущей частоты при записи голограмм фототермопластическим носителем (ФТПН) на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) с луночной структурой деформации.

Используемый ФТПН представлял собой многослойную систему: лавсановая подложка, металлический электрод (хром), фоточувствительный полупроводник $0,3(\text{As}_2\text{S}_3)0,7(\text{As}_2\text{Se}_3)$, термопластический слой (БМА-50). Запись голографических дифракционных решеток (ГДР) осуществлялась при помощи He-Ne лазера ($\lambda = 632,8$ нм) по стандартно внеосевой схеме.

В качестве параметров характеризующих качество зарегистрированного голографического изображения были использованы дифракционная эффективность η , отношение сигнал/шум (ОСШ), а так же полуширина Δf в зависимости $\sqrt{\eta} = \varphi(f)$.

Дифракционная эффективность определялась как отношение интенсивности света в первом порядке дифракции к интенсивности света прошедшего через недеформированный учас-

ток ФТПН. ОСШ определялось как отношение I_1 – интенсивности света в первом порядке дифракции к $I_{ш}$ – интенсивности света на той же пространственной частоте вне зоны дифракционного максимума. Контраст K определялся как отношение разности I_1 и $I_{ш}$ к их сумме. Измерения проводились в прошедшем свете на длине волны $\lambda = 632,8$ нм (He-Ne лазер).

Зависимость $\eta = \varphi(f)$ имеет 3 максимума (рис. 1). Высокочастотный максимум соответствует резонансной частоте $f_{рез}$ ФТПН (в данном случае 660 мм^{-1}), остальные 2 максимума находятся на частотах в 2 и в 3 раза меньше резонансной частоты. Высокочастотный максимум соответствует выстраиванию лунок в один ряд на поверхности ФТПН в эквидистантно расположенные параллельные линии. Максимум на частоте 330 мм^{-1} передается выстраиванием лунок в 2 ряда, а максимум на частоте 220 мм^{-1} передается выстраиванием лунок в 3 ряда.

Распределение отношения сигнал/шум (ОСШ) по пространственным частотам (рис. 2) качественно повторяет ход зависимости $\eta = \varphi(f)$. Значения η и ОСШ соответствующие максимумам в их зависимостях от пространственной частоты представлены в табл. 1.

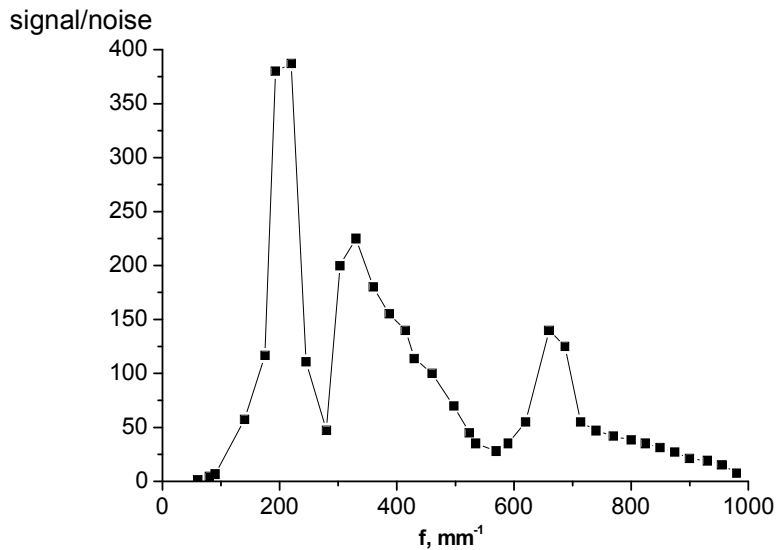


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от пространственной частоты f голографической дифракционной решетки

Таблица 1

Дифракционная эффективность и ОСШ при регистрации пространственных частот соответствующих максимумам в зависимостях $\eta = \varphi(f)$ и $ОСШ = \varphi(f)$

$f, \text{мм}^{-1}$	η	ОСШ
220	0,11	387
330	0,04	225
660	0,02	140

Из таблицы видно, что наиболее качественно ФТПН регистрирует частоты в 2 и в 3 раза меньше $f_{рез}$. Именно их следует использовать в качестве средней несущей частоты при записи голограмм. Однако при этом происходит потеря разрешающей способности по сравнению с резонансной частотой. Поэтому необходимо использовать более тонкий термопластический слой при этом максимумы в зависимости $\eta = \varphi(f)$ и $ОСШ = \varphi(f)$ смещаются в более высокочастотную область.

По-видимому, при записи наиболее рационально использовать частоту максимума соседнего с максимумом находящимся на резонансной частоте, так как при этом не требуется использовать очень тонкие слои термопластического слоя. Было установлено, что отношение частот этих максимумов при увеличении потенциала коронирующего электрода изменяется от 2 до 1,5, что обусловлено тенденцией лунок к гексагональному закону упаковки при высоких потенциалах записи. В табл. 2 приведены параметры изображения при записи частоты $f_{\text{рег.}} = 300 \text{ мм}^{-1}$ на ФТПН с различной толщиной d термопластического слоя. Для используемых ФТПН и выбранных условий записи частота 300 мм^{-1} является резонансной для толщины термопластика 1,3 мкм, а для ФТПН с толщиной термопластика 1 мкм эта частота совпадает с частотой максимума, соседнего с резонансной в зависимости $\eta = \varphi(f)$. На этих двух образцах были измерены контраст изображения K , ОСШ, η и полуширина Δf в зависимости $\sqrt{\eta} = \varphi(f)$.

Таблица 2

Параметры изображения при регистрации пространственной частоты 300 мм^{-1} на ФТПН с толщиной термопластического слоя 1 и 1,3 мкм

$d, \mu\text{км}$	$f_{\text{рег.}}, \text{мм}^{-1}$	$f_{\text{рез.}}, \text{мм}^{-1}$	ОСШ	$\eta, \%$	K	$\Delta f, \text{мм}^{-1}$
1	300	450	200	2,25	0,99	100
1,3	300	300	20	0,25	0,91	50

Заключение

Наиболее качественно ФТПН с луночной структурой деформации регистрирует голографические решетки с пространственной частотой в 3 раза меньше резонансной, но при голографической записи для увеличения качества голографического изображения в качестве средней несущей частоты наиболее оптимально выбирать частоту в 1,5-2 раза меньше резонансной частоты фототермопластического носителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nastas A.M.* // Optics and Spectroscopy. – Vol. 95, No. 6, 2003. – P. 952-955.
2. *Panasyuk L.M. and Nastas A.M.* // Optics and Spectroscopy. – Vol. 94, No. 6, 2003. P. 959-961.

SELECTION OF MEDIUM HOLDING FREQUENCY DURING HOLOGRAPHIC REGISTRATION ON THE PHOTO-THERMO-PLASTIC CARRIER BASED ON CHALCOGENIDE VITREOUS SEMICONDUCTORS

Nastas A.M., Iovu M.S.

(Institute of Applied Physics, Academy of Sciences of Moldova, R. Moldova)

In the present paper the research object was the holographic gratings formed on the surface of photo-thermo-plastic carrier with the alveolar deformable structure based on chalcogenide vitreous semiconductors. It was established that the dependencies of the diffraction efficiency and of the ration signal/noise versus gratings frequency are similar and has 3 maximums. On the base of assisted of complex investigations it was concluded, that for increasing of the quality of the holographic image, the medium holding frequency must be of 1,5-2 times less that the resonance frequency of the photo-thermoplastic carrier.

The aim of the present paper consists in determination of the optimal frequency for writing of the gratings and of medium holding frequency during recording of hologram on the photo-thermo-plastic carrier (PTPC) with the alveolar deformable structure based on chalcogenide vitreous semiconductors (ChGS). The methodology of preparation and investigation of samples are described in [1,2].

Fig. 1 shows that the dependence of the diffraction efficiency η versus special frequency f of the holographic grating has 3 maximums. The high frequency maximum corresponds to the resonance frequency of the PTPC (in our case $\nu = 660 \text{ mm}^{-1}$), the rest 2 maximums are located at frequencies of 2 and 3 times less than that of resonance. The high frequency maximum corresponds to the alignment of the holes in the one line on the surface of the PTPC in the positioned equal-distance parallel lines. The maximum located at frequency $\nu = 330 \text{ mm}^{-1}$ consist to the alignment of the holes in 2 rows, and the maximum located at frequency $\nu = 220 \text{ mm}^{-1}$ consist to the alignment of the holes in 3.

The distribution of the ration signal noise (RSN) along the spatial frequencies qualitative repeat the dependence $\eta = \varphi(f)$ (table 1). Table 1 shown, that more qualitative the PTPC registered the frequencies on 2 and 3 times less than the resonance frequency. Namely they must be used as medium holding frequency for registration of hologram. Just they must be selected as medium holding frequency for registration of hologram. But in this case take place some losing of the spatial resolution in respect with the resonance frequency. Therefore, for the registration media is necessary to use the thermo-plastic layer with smaller thickness. In this case the maximums in the dependencies $\eta = \varphi(f)$ and $RSN = \varphi(f)$ will be displacement in the more high frequency region.

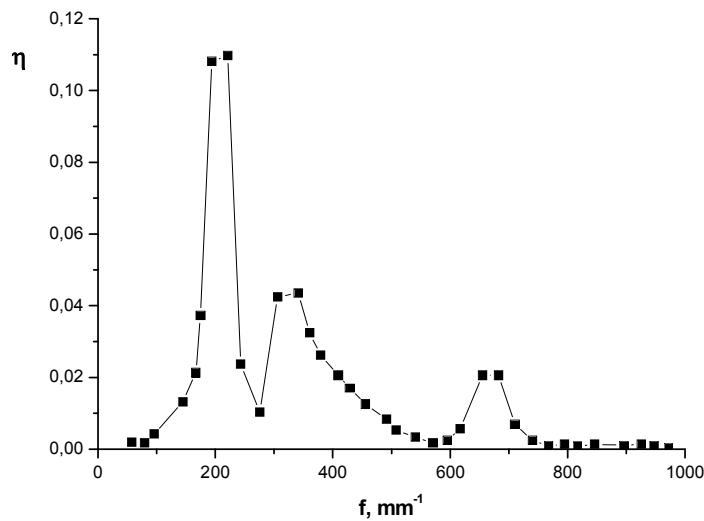


Fig. 1. Dependence of the diffraction efficiency η versus special frequency f of the holographic diffraction grating

Table 1

The diffraction efficiency η and RSN corresponding different maximums in the dependencies $\eta = \varphi(f)$ and $RSN = \varphi(f)$

f, mm^{-1}	$\eta, \%$	RSN
220	0,11	387
330	0,04	225
660	0,02	140

Apparently, during the registration process it is more rationally to use the frequency of the neighboring maximum which is located beside of the maximum with the resonance frequency, because this procedure don't need awful thin thermoplastic layers. It was established, that the frequency ratio of these maximums is changing from 2 up to 1.5 with increasing of the voltage of the corona electrode. In Table 2 the parameters of the image formed during the recording process at the frequency $\nu = 300 \text{ mm}^{-1}$ and with different thickness of the PTPC. For the selected PTPC and conditions holographic recording, the frequency $\nu = 300 \text{ mm}^{-1}$ is the resonance for the thermoplastic thickness of 1,3 mm. For the PTPC with the 1 mm thickness of the thermoplastic this frequency correspond to the frequency of the neighboring with the resonance maximum in the dependence $\eta = \varphi(f)$. For these two samples was measured the contrast of the holographic image K , RSN , η and the width half Δf in the dependence $\eta = \varphi(f)$.

Table 2

**Parameters of the holographic image at registration
 with the spatial frequency $\nu = 300 \text{ mm}^{-1}$ using the FTPC
 with the thermoplastic thickness of 1 and 1,3 mm**

$d, \mu\text{m}$	f_{rec}, mm^{-1}	f_{res}, mm^{-1}	RSN	$\eta, \%$	K	$\Delta f, \text{mm}^{-1}$
1	300	450	200	2,25	0,99	100
1,3	300	300	20	0,25	0,91	50

Summary

The PTPC with the alveolar deformable structure registered more qualitative holographic gratings with the special frequencies which are on 3 times lower than the resonance one. But at the holographic registration in order to increase the quality of the holographic image is necessary as medium holding frequency to select on 1,5-2 times lower than the resonance frequency of the photo-thermoplastic carrier.

REFERENCES

1. *Nastas A.M.* // Optics and Spectroscop. – Vol. 95, No. 6, 2003. – P. 952-955.
2. *Panasyuk L.M. and Nastas A.M.* // Optics and Spectroscopy. – Vol. 94, No. 6, 2003. – P. 959-961.

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ГОЛОГРАММ НА ОБРАЗЦАХ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА «ДИФФЕН»

Андреева О.В., Манухин Б.Г., Кудрявцев П.В., Мосейко Д.А., Чивилихин С.А.

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), г. Санкт-Петербург)

Полимерные материалы находят широкое применение в качестве регистрирующей среды для записи объемных голограмм, используемых в качестве высокоселективных голограммных оптических элементов и элементов для систем архивной памяти. Поглощение воздействующего излучения в процессе регистрации голограмм приводит к изменению оптических параметров образца не только за счет его фотообесцвечивания, но и за счет повышения температуры образца. Температурные эффекты при использовании полимерных образцов могут привести к искажению регистрируемой интерференционной структуры, что особенно опасно при получении высокоселективных элементов на полимерных образцах толщиной несколько миллиметров. Однако информации о том, каков может быть диапазон изменений температуры полимерных образцов при различных условиях реального эксперимента, практически не имеется.

В качестве объекта исследования в работе использованы образцы полимерного материала лабораторного изготовления «Диффен», представляющего собой твердый раствор фенантренина (ФХ) в полиметилметакрилате (ПММА) [1].

Изменение температуры образца в процессе записи голограммы оценивалось с помощью тепловизора. Такая методика позволяет осуществлять непрерывный контроль температуры исследуемого объекта в ходе всего эксперимента и обеспечивает достоверные измерения с точностью до 0,1 °С.

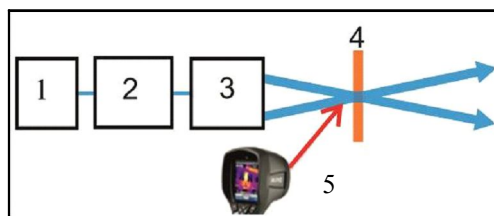


Рис. 1. Блок-схема эксперимента:

1 – ионный Ag-лазер ($\lambda = 488$ нм); 2 – узел формирования пучка; 3 – интерферометр;
4 – узел крепления образца регистрирующей среды; 5 – тепловизор

Серия термограмм регистрировалась как во время записи голограммы, так и в постэкспозиционный период. На рис. 2, а приведен типичный вид термограммы, полученной во время записи голограммы, а также изменение температуры образца в области воздействия излучения в сечении А-А (рис. 2, б) и изменение температуры образца в центре воздействия излучения во время записи и постэкспозиционной релаксации голограммы (рис. 2, в). Было обнаружено, что, в зависимости от условий эксперимента (плотность мощности излучения, толщина образца) при достижении оптимальных экспозиций температура образца изменялась на величину от двух до семи кельвинов.

Типичный вид термограммы, полученной во время записи голограммы (рис. 2, а); изменение температуры образца в области воздействия излучения в сечении А-А (рис. 2, б); изменение температуры образца в центре воздействия излучения во время записи и постэкспозиционной релаксации голограммы. С целью снижения температурных эффектов, сопровождающих запись голограмм на полимерных образцах, была использована конструкция крепления исследуемых образцов в кассете между защитными стеклами.

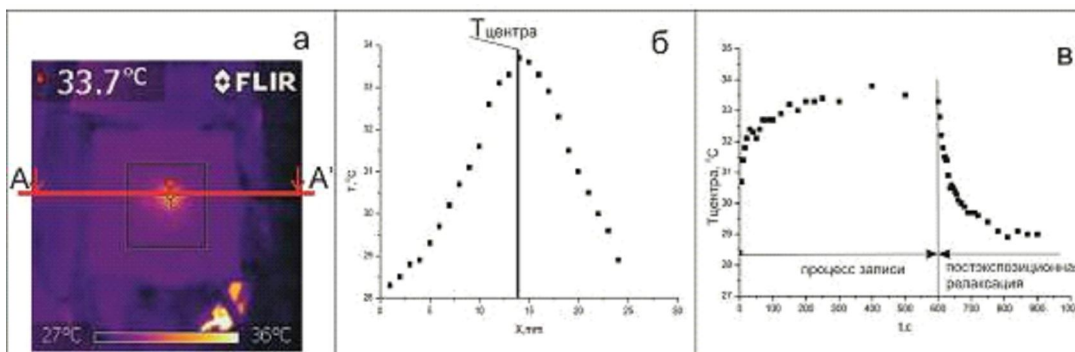


Рис. 2. Типичный вид термограммы, полученной во время записи голограммы (а); изменение температуры образца в области воздействия излучения в сечении А-А (б); изменение температуры образца в центре воздействия излучения во время записи и постэкспозиционной релаксации голограммы

На рис. 3 приведены результаты измерения температуры образца, полученные при воздействии излучения одинаковой плотности мощности на образец в свободном состоянии и в случае использования защитных стекол. Толщина исследуемого образца составляла 1,5 мм, а толщина защитных стекол – 2 мм. Как видно из приведенных данных, максимальное изменение температуры образца (ΔT_0) в свободном состоянии составляло 5,5 К, в то время как в присутствии защитных стекол температура образца изменялась не более чем на 1,5 К.

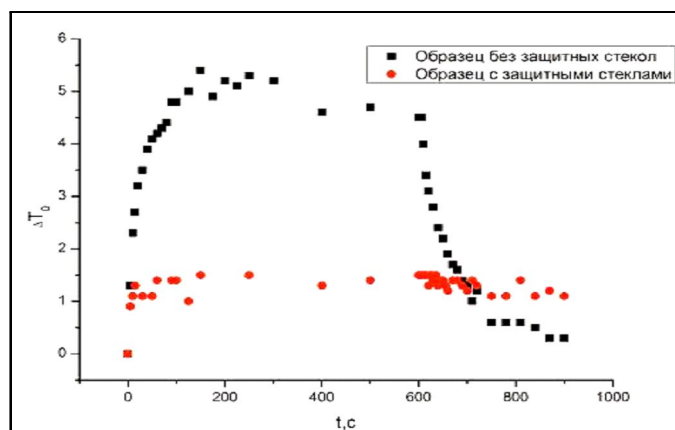


Рис. 3. Зависимость изменения температуры образца (ΔT_0) во время воздействия излучения (0-600 сек) и постэкспозиционной релаксации (600-1000 сек).
Образец находится между защитными стеклами (●) и в свободном состоянии (■)

Таким образом, использование защитных стекол при регистрации голограмм значительно снижает тепловые эффекты, т.е. данная конструкция выполняет функцию отвода тепла от нагретой области, а также наличие защитных стекол обеспечивает стабильность положения образца при записи голограммы.

Наличие теплоотвода, который обеспечивают защитные стекла, позволяет существенно стабилизировать параметры полимерного образца при регистрации голограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Andreeva O.V., Bandyuk O.V.* Light-sensitive Media-Composites for Recording Volume Holograms Based on Porous Glass and Polymer. Holograms – Recording materials and Applications, Edited by Izabela Naydenova, 2011, ISBN 978-953-307-981-3. – P.45-70.

**THE THERMAL EFFECTS AT RECORDING HOLOGRAMS
ON POLYMER MATERIAL «DIFPHEN»**

Andreeva O., Manukhin B., Kudriavcev P., Moseyko D., Chivilikhin S.

(ITMO University, Saint-Petersburg)

The results of experiment on the influence of temperature of the environment on the parameters of the volume polymer holograms are presented. The experiments were carried out on specialized holographic setup using digital procedures of recording information. The results of experiments that allow us to estimate the impact of temperature changes of the environment on the parameters of volume hologram-gratings are presented. The use of holographic procedures allows to diagnose negligibly small changes of parameters of the samples, which are due to temperature instability that usually unattainable by other methods of research.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ДИФРАКЦИОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПЛЕНКАХ ГИБРИДНОГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА «ГИБРИМЕР-42»

*Деревянко Д.И., Миронников Н.Г., Шелковников В.В., Корольков В.П.,
Бережная В.Н., Орлова Н.А., Огнева Л.Н., Лоскутов В.А.
(Институт органической химии СО РАН, г. Новосибирск)*

Аннотация

В данной работе путем свободно радикальной фотополимеризации гибридного фотополимерного материала «Гибример-42» были получены микроstructures с многоуровневым дифракционным микро рельефом, а так же была исследована зависимость формирования микро рельефа от пропускания фотошаблона.

Введение

В НИОХ СО РАН на основе акрилатных и тиол-силоксановых олигомеров была синтезирована гибридная фотополимерная композиция ГФК [1]. Сочетание в ГФК свойств неорганической и органической составляющих дает возможность формировать микроstructures из гибридных фотополимерных материалов (ГФМ) на их основе с широким диапазоном физико-химических характеристик [2].

Целью данной работы было получение на основе ГФМ «Гибример-42» (мольное соотношение – 2:1 акрилатный : тиол-силоксановый олигомер) микроstructures с многоуровневым дифракционным микро рельефом.

Экспериментальная часть

Приготовление пленок ГФМ «Гибример-42» для записи микроstructures. 200 мкл 20 % раствора ГФК в хлороформе смешивалось с 10 мг фотоинициатора гексафторфосфат 2,4-диэтил-9-оксо-10-(4-гептилоксифенил)-9Н-тиоксантина, описанного в работе [3]. Композиция наносилась на стеклянную подложку размером 2,5Ч2,5 см², путем центрифугирования при 4000 об/сек. Высушенные экспериментальные образцы представляли собой слои ГФМ «Гибример-42», толщиной 4 мкм на стеклянной подложке.

Запись дифракционных решеток осуществляли излучением с длиной волны 405 нм. После облучения образцов было проведено вымывание необлученной части ГФМ «Гибример-42» в хлороформе.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Запись микроstructures на длине волны 405 нм была проведена через полутонной шаблон с использованием установки контактной литографии ЭМ-576АМ (НПП ЭСТО, Россия). В данной работе шаблон накладывается на пленку ФПМ «Гибример-42». На рис. 1 представлена 2-D профилограмма структур полученная на пленках ГФМ «Гибример-42» толщиной 4 мкм с помощью интерферометра белого света WLI (Breitmeier Messtechnik GmbH, Германия). Время экспозиции для достижения необходимой дозы составляло 5 мин.

Для того что бы выявить зависимость нелинейных параметров при изготовлении микроstructures методом контактной литографии, в данной работе была получена фотография шаблона с использованием ультрафиолетового фильтра на микроскопе Carl Zeiss (Carl Zeiss Foundation,

Германия) (рис. 1, б). Настройка яркости камеры устанавливались таким образом, чтобы захватить весь динамический диапазон по яркости. Далее, проведя анализ яркости пикселей, был построен профиль пропускания шаблона, который был сравнен с профилограммой поверхности полученной на интерферометре белого света WLI (рис. 2).

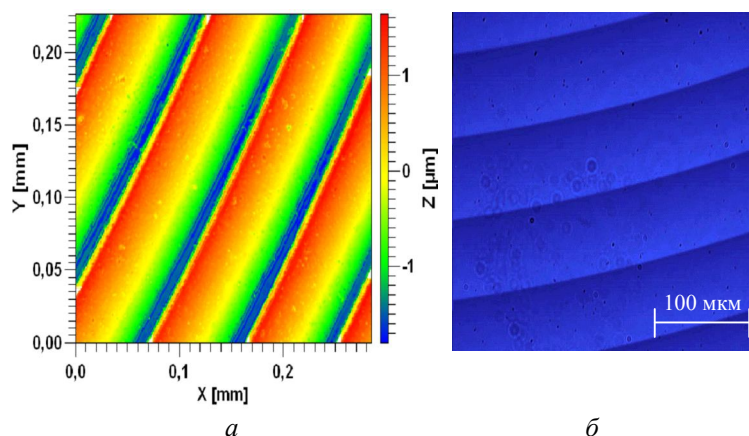


Рис. 1. 2-D Профиль поверхности полученных структур (а); фотография шаблона (б)

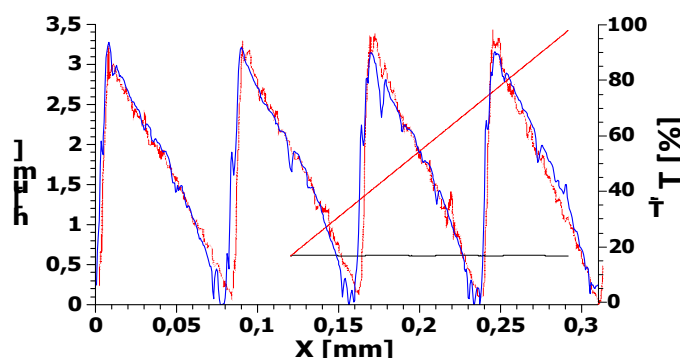


Рис. 2. Профиль поверхности микроструктур структур, наложенный на пропускание фотошаблона

Из рис. 2 можно сделать вывод о том, что процесс фотополимеризации зависит линейно от пропускания фотошаблона. Данный эксперимент подтверждает возможность создания массового изготовления дифракционных элементов методом фотолитографии.

Заключение

В работе были определены параметры технологических процессов изготовления механически и химически прочных микроструктур на основе воздействия света на ГФМ «Гибример-42». Продемонстрирована возможность получения многоуровневых фазовых микроструктур на исследуемом материале методом фотолитографии на длине волны 405 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деревянко Д.И., Шелковников В.В., Эктова Л.В., Орлова Н.А., Огнева Л.Н., Сальников Г.Е. Гибридный фотополимерный материал на основе тиол-силоксан-акрилатных олигомеров // Актуальные проблемы органической химии: тез. докл. всерос. школа-конференции. – 2015. – С. 18.

2. Миронников Н.Г., Корольков В.П., Деревянко Д.И. Исследование механических и термо-оптических свойств нового гибридного фотополимерного материала // Сборник трудов международной конференции «СибОптика-2015». – 2015. – С. 56.

3. Лоскутов В.А., Шелковников В.В. Синтез гексафторфосфатов 2-оксо-10-(гептилфенил)тиоксантения // Журн. орган. химии. – 2006. – Т. 42, 2. – С. 313.

RESEARCH OF OPTICAL METHODS FORMING OF MULTILEVEL DIFFRACTIVE MICRORELIEF ON FILMS OF HYBRID PHOTOPOLYMER MATERIAL «HYBRIMER-42»

***Derevyanko D.I., Mironnikov N.G.², Shelkovnikov V.V., Korolkov V.P.²,
Berezhnaya V.N., Orlova N.A.¹, Loskutov V.A.***

(¹Institute of Organic Chemistry of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk;

²Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk)

Annotation

In this work, a possibility of forming multilevel diffractive microrelief on films of hybrid photopolymer material «hybrimer-42» has been demonstrated by photolithography at a wavelength of 405 nm. A linear dependence of the height of the micro-relief from transmission of photomask has been researched.

СЕКЦИЯ 4

**ГОЛОГРАММНЫЕ И ДИФРАКЦИОННЫЕ
ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ,
МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА,
ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
И ПРИМЕНЕНИЕ**

SECTION 4

**HOLOGRAPHIC AND DIFFRACTIVE
OPTICAL ELEMENTS,
METHODS OF COMPUTER SYNTHESIS,
TECHNOLOGY OF THEIR MANUFACTURE
AND APPLICATION**

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОДНОВРЕМЕННОГО ПОДАВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ И УГЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ МИКРОСТРУКТУР

Грейсух Г.И.¹, Данилов В.А.², Ежов Е.Г.¹, Степанов С.А.¹, Усиевич Б.А.³

(¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства;

²Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, г. Москва;

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва)

Одной из наиболее ощутимых проблем, сдерживающих использование дифракционных линз (ДЛ) в изображающих оптических системах, является зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру. Снизить указанную зависимость высокоэффективных рельефно-фазовых микроструктур, позволяет переход от однослойных микроструктур к микроструктурам, состоящим из нескольких слоев и рельефов (см., например, [1-6]). В докладе приводится сравнительный анализ возможностей одновременного подавления спектральной и угловой зависимостей ДЭ рельефно-фазовых микроструктур на примере двухслойной однорельефной и двухслойной двухрельефной микроструктур.

Анализ проводился в рамках скалярной и строгой теорий дифракции. При этом полагалось, что рабочим является видимый спектральный диапазон (длина волны λ лежит в интервале $0,4 < \lambda < 0,7$ мкм), рельефно-фазовая микроструктура имеет пилообразный профиль и выполнена в коммерчески доступной оптической пластмассе, что позволяет сравнительно просто осуществить массовое тиражирование таких микроструктур. Кроме того, полагалось, что в пределах всей микроструктуры ее относительный период удовлетворяет неравенству

$$\Lambda/h_{\max} > 20, \quad (1)$$

где Λ – период микроструктуры, равный ширине зоны Френеля, т.е. участка микроструктуры, в пределах которого фазовая задержка, вносимая ДЛ в падающий волной фронт, изменяется от 0 до 2π ; h_{\max} – максимальная глубина микрорельефа.

Неравенство (1) выбрано исходя из того, что оно, во-первых, характерно для микроструктур ДЛ, входящих в состав изображающих рефракционно-дифракционных объективов, работающих в видимом спектральном диапазоне [7-14]. Во-вторых, как показали расчеты, при соблюдении неравенства (1) скалярная и строгая теории дифракции дают сопоставимые результаты [15-17].

Здесь отметим, что при расчете ДЭ пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры в рамках скалярной теории дифракции (СТД) использовалась формула [18]

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{\Delta l}{\lambda} - m \right) \right]}{\pi \left(\frac{\Delta l}{\lambda} - m \right)} \right\}^2, \quad (2)$$

где Δl – приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля λ – длина волны падающего на микроструктуру излучения, m – номер дифракционного порядка (в нашем случае $m = 1$).

Приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля двухслойной однорельфной (рис. 1) и двухслойной двухрельфной (рис. 2) микроструктур описываются выражениями

$$\Delta l = h \left(\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta} \right), \quad (3)$$

$$\Delta l = h_1 \left(\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) - h_2 \left(\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right), \quad (4)$$

соответственно [19]. Здесь h , h_1 , h_2 – глубины рельефов, n_1 , n_2 – показатели преломления материалов микроструктуры на длине волны λ , θ – угол падения излучения на микроструктуру.

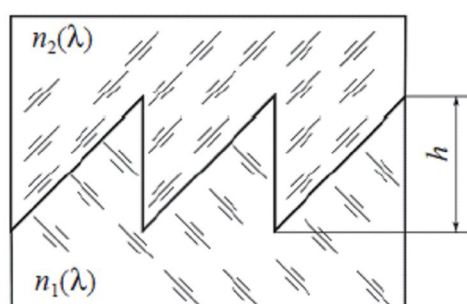


Рис. 1. Двухслойная однорельфная пилообразная рельефо-фазовая микроструктура

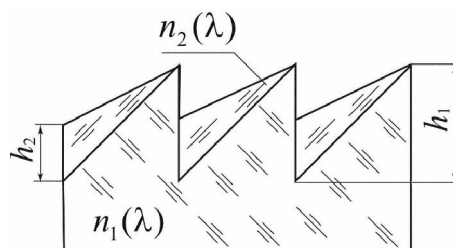


Рис. 2. Двухслойная пилообразная рельефо-фазовая микроструктура с внутренним и наружным рельефами

Строгая теория дифракции основана на решении системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями [6]. ДЭ пилообразной рельефо-фазовой микроструктуры в рамках строгой теории дифракции рассчитывалась с помощью компьютерной программы, представленной в [20]. Эта программа основана на одном из наиболее распространенных численных методов решения систем уравнений Максвелла для расчета ДЭ – так называемом строгим методе связанных волн (Rigorous coupled-wave analysis (RCWA)) [21].

RCWA-метод предполагает замену пилообразного рельефа дифракционной микроструктуры ступенчатым и к каждой ступени применяется разложение в ряд Фурье. Точность метода определяется высотой равновысоких ступеней и числом гармоник ряда Фурье. Наши исследования показали, что при высоте ступеней порядка $0,2 \lambda_{\min}$ и числе гармоник ряда Фурье больше 300, достигается хорошая сходимость результатов расчета, а, следовательно, и их высокая достоверность. Здесь λ_{\min} – минимальная длина волны рабочего спектрального диапазона.

СТД использовалась на первом этапе для определения предварительных оптимальных значений глубин рельефов микроструктур и оценки получаемой при этом ДЭ. На втором этапе с использованием RCWA-метода уточнялись полученные на первом этапе предварительные значения глубин рельефов и производилась окончательная оценка результатов подавления спектральной и угловой зависимостей ДЭ рассматриваемой рельефо-фазовой микроструктуры. При этом применительно к изображающим рефракционно-дифракционным объективам, предназначенным для профессиональной фотосъемки, полагалось приемлемым, что в пределах рабочего спектрального диапазона и рабочего диапазона углов падения излучения на микроструктуру ДЛ ее ДЭ не опускается ниже 95 %.

Обращаясь к двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуре (см. рис. 1), отметим, что уже в одной из первых работ, посвященных выбору материалов для снижения зависимости ДЭ двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуры от длины волны, были сформулированы нижеследующие требования [22]. Материалы двух слоев должны иметь разную величину дисперсии и материал с меньшей дисперсией должен иметь больший показатель преломления. В случае стекол это реализуется парой, включающей крона (малая дисперсия) и флинт (большая дисперсия), причем показатель преломления крона должен превышать показатель преломления флинта. Последнее требование, практически, исключало возможность изготовления обоих слоев микроструктуры из коммерчески доступных пластмасс. В то же время всему комплексу вышеприведенных требований может удовлетворять целый ряд пар материалов, включающих технологичную и коммерчески доступную пластмассу и оптическую жидкость. Однако химическая активность большинства оптических жидкостей в отношении пластмасс не позволяла до недавнего времени рассматривать такой вариант как практически осуществимый.

Ситуация принципиально изменилась благодаря технологическим успехам в области нанесения просветляющего и одновременно химически защищающего покрытия на дифракционный микрорельеф, выполненный в пластмассе (см, например, [23]). В результате сегодня актуальность исследования потенциальных возможностей двухслойных однорельефных микроструктур, состоящих из пластмассы и оптической жидкости, не вызывает сомнений. Механическую жесткость такой микроструктуре может легко обеспечить не имеющий рельефа покровный слой, выполненный из стекла или пластмассы и никаким образом не влияющий на ДЭ микроструктуры. Поэтому при анализе ДЭ двухслойной однорельефной микроструктуры наличие покровного слоя, как правило, не учитывают.

Результаты исследований, представленные в работе [17], показали, что достичь наибольшего подавления спектральной и угловой зависимостей ДЭ двухслойной однорельефной микроструктуры, состоящей из пластмассы и оптической жидкости, позволяет пара, включающая оптическую пластмассу марки E-48R и оптическую жидкость торговой марки Toluene. При оптимальной глубине рельефа $h = 15,02$ мкм, ДЭ рассматриваемой двухслойной однорельефной микроструктуры не опускается ниже 95% в пределах спектрального диапазона $0,4 < \lambda < 0,7$ мкм и углов падения излучения $|\theta| \leq 16^\circ$. При этом минимальный период микроструктуры ДЛ не должен быть меньше величины $\Lambda_{\min} \cong 300^\circ$ мкм.

Переход от двухслойной однорельефной микроструктуры к двухслойной микроструктуре с внутренним и наружным рельефами (см. рис. 2) позволяет достичь практически полного подавления спектральной зависимости ДЭ в пределах видимого спектрального диапазона при использовании коммерчески доступных оптических пластмасс (например, пары полиметилметакрилат-поликарбонат). Как показано в работах [15, 16], при оптимальных глубинах слоя полиметилметакрилата ($h_1 = 15,1$ мкм) и поликарбоната ($h_2 = 11,7$ мкм) ДЭ рассматриваемой двухслойной микроструктуры с внутренним и наружным рельефами не опускается ниже 95% в пределах спектрального диапазона $0,4 < \lambda < 0,7$ мкм и углов падения излучения $|\theta| \leq 15^\circ$. При выполнении условия (1) минимальный период двухслойной микроструктуры ДЛ с внутренним и наружным рельефами не должен быть меньше величины $\Lambda_{\min} = 302^\circ$ мкм, т.е. практически совпадает со случаем двухслойной однорельефной микроструктуры.

Таким образом, представленные в докладе результаты сравнительного анализа возможностей одновременного подавления спектральной и угловой зависимостей ДЭ рельефно-фазовых микроструктур позволяют сформулировать требования к параметрам ДЛ и режиму ее работы при проектировании изображающих рефракционно-дифракционных объективов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафииков Р.А. Голограммный оптический элемент // Патент России № 1271240, Россия. – 1996.
2. Arieli Y., Ozeri S., Eisenberg N. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth // Optics Letters, 1998. – Vol. 23, N 11. – P. 823-824.
3. Takehiko Nakai. Diffractive optical element and optical system having the same // Patent № US 20010038503A1. 2001.
4. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 1. – С. 80-87.
5. Kleemann B., Seibelberg M., Ruoff J. Design concepts for broadband high-efficiency DOEs // Journal of the European Optical Society – Rapid Publications. – 2008. – Vol. 3. – P. 08015-1-08015-16.
6. Грейсух Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур // Оптика и спектроскопия, 2009. – Т. 106, № 4. – С. 694-699.
7. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems // Applied Optics. 2006. – Vol. 45. – No 24. – P. 6137-6141.
8. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. Дифракционно-рефракционный корректор третичного спектра // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 9. – С. 22-29.
9. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives // Applied Optics. Opt. 2010. – Vol. 49, No 23. – P. 4379-4384.
10. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Kalashnikov A.V., Stepanov S.A. Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, No 20. – P. 4597-4604.
11. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Калашиников А.В., Левин И.А., Степанов С.А. Моделирование и исследование суперахроматизации рефракционных и рефракционно-дифракционных оптических систем // Компьютерная оптика, 2012. – Т. 36. – № 3. – С. 395-404.
12. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Sidiyakina Z.A., Stepanov S.A. Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for plastic compact zoom lenses // Applied Optics, 2013. – Vol. 52, No 23. – P. 5843-5850.
13. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Сидякина З.А., Степанов С.А. Расчет и анализ компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного вариообъектива // Компьютерная оптика, 2013. – Т. 37. – № 2. – С. 210-214.
14. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Калашиников А.В., Левин И.А., Степанов С.А. Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля // Оптика и спектроскопия, 2012. – Т. 113. – № 4. – С. 425-430.
15. Greisukh G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A., Usievich B.A. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // Optics Communication, 2015. – Vol. 338. – P. 54-57.
16. Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельфной и двухслойной микроструктурой // Оптический журнал, 2015. – Т. 82. – № 5. – С. 56-61.
17. Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. Спектральная и угловая зависимость эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трехслойной микроструктурой // Оптика и спектроскопия, 2015. – Т. 118. – № 6. – С. 118-125.
18. Buralli D.A., Morris G.M., Rogers J.R. Optical performance of holographic kinoforms // Applied Optics, 1989. – Vol. 28. – P. 976-983.
19. Zhao Y.H., Fan C.J., Ying C.F., Liu S.H. The investigation of triple-layer diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency // Optics Communication, 2013. – Vol. 295. – P. 104-107.

20. Lyndin N.M. MC Grating Software Development Company. <http://www.mcgrating.com>
21. Moharam M.G., Gaylord T.K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // Journal of the Optical Society of America, 1981. – Vol. 71. N 7. – P. 811-818.
22. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур // Компьютерная оптика, 2008. – Т. 32. – №1. – С. 43-46.
23. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200>

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF SIMULTANEOUS SUPPRESSION OF THE SPECTRAL AND ANGULAR DEPENDENCE OF THE DIFFRACTION EFFICIENCY OF THE RELIEF-PHASE MICROSTRUCTURES

Greisukh G.¹, Danilov V.², Ezhov E.¹, Stepanov S.¹, Usievich B.³

(¹Penza State University of Architecture and Construction, Penza;

²Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow;

³General Physics Institute of RAS, Moscow)

One of the more notable problems hampering the use of diffractive lenses (DL) in the imaging optical system is the dependence of the diffraction efficiency (DE) of the wavelength and the angle of incidence of the radiation on the microstructure. The transition from single-layer microstructures to the microstructures consisting of several layers and reliefs allows reducing this dependence of highly effective relief-phase microstructure. The report provides comparative analysis of the possibility of simultaneous suppression of the spectral and angular dependence of the diffraction efficiency of the relief-phase microstructures on the example of two-layer single-relief microstructure and two-layer microstructure with internal and external reliefs.

The analysis was carried out in the framework of the scalar and rigorous diffraction theory. It is shown that the pair comprising the plastic of the optical mark E-48R and the optical fluid of Toluene brand allows to achieve maximum suppression of the spectral and angular dependence of DE of two-layer single-relief microstructure. At the optimum depth of the relief, DE of two-layer single-relief microstructure does not fall below 95 % within the spectral range $0,4 < \lambda < 0,7$ mm and the angles of incidence of radiance $|\theta| \leq 16^\circ$.

The transition from the two-layer single-relief microstructure to the two-layer microstructure with internal and external reliefs allows achieving almost complete suppression of the spectral dependence of DE within the visible spectral range when using commercially available optical plastics (e.g., polymethylmethacrylate and polycarbonate pair).

It is shown that if the depths of the layers are optimal, DE of considered two-layer microstructure with internal and external relief does not fall below 95 % within the spectral range $0,4 < \lambda < 0,7$ mm and angles of incidence $|\theta| \leq 15^\circ$.

Thus, the report presents the results of comparative analysis of the possibility of simultaneous suppression of the spectral and angular dependences of DE of the relief-phase microstructures. At the design of the imaging refractive-diffractive objectives, these results allow formulating the requirements to the parameters of DL and the mode of its operation.

HOLOGRAPHIC METHOD OF THREE-DIMENSIONAL SURFACES FORMATION

Vorzobova N.D., Bulgakova V.G., Veselov V.O.

*(Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, St. Petersburg)*

The principle of three-dimensional polymeric surfaces obtaining, based on the displaying in the volume of polymerizable material three-dimensional intensity distribution of the laser radiation formed by the hologram is considered.

Currently, methods and techniques for obtaining three-dimensional polymeric elements are the subject of extensive scientific research. These technologies include, in particular, technologies for deep and tone lithography [1-3]. The greatest interest is observed to technologies of stereolithography or 3-D printing, based on the prescription of three-dimensional elements of a focused laser beam (direct laser writing) [4, 5]. However, with point-by-point and layer-by-layer formation with appropriate software, the process of three-dimensional elements obtaining requires a lot of time (several hours).

In this paper we propose a method based on the formation three-dimensional surface as a result of single light action. The idea is the projection of the three-dimensional intensity distribution of the laser radiation formed by the hologram, in photocurable material (Fig. 1) and it displaying in the volume of material.

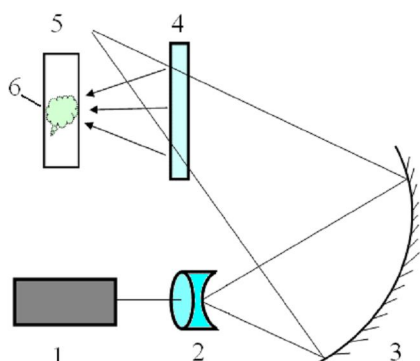


Fig. 1. A basic scheme of a holographic projection:
1 – laser; 2 – microobjective; 3 – spherical mirror;
4 – projecting hologram; 5 – reconstructed image;
6 – photocurable material

The main problem with the displaying of the projected three-dimensional distribution of radiation intensity is the depth of curing. It is necessary to ensure curing in the areas of greatest sharpness (or brightness) of the projected image and to limit the polymerization before and after the area of sharpness. In the work are proposed and implemented the principles limiting the depth of curing, including requirements to material, projection conditions, exposure parameters. The experimental confirmation of the projected intensity distribution displaying in the volume of material when implementing the proposed principles is received.

In the experiments as projecting holograms, the holograms recorded by pulse radiation in the green region of the spectrum were used. In Fig. 2 shows an example of the holographic images and the elements obtained in implementing the proposed principles the depth of curing limiting. For comparison, the result obtained under normal conditions is presented – the layer is cured on all depth (Fig. 2, e).

In the recording material can be displayed a gradation of intensity in the reconstructed image and configuration of the wave front simultaneously. On the example the projection holographic images of specially manufactured model objects with different shape of the surface the ability to display the configuration of the projected wave front and a three-dimensional polymeric elements obtaining is shown. The elements can be formed on glass or film and separated from the substrate.

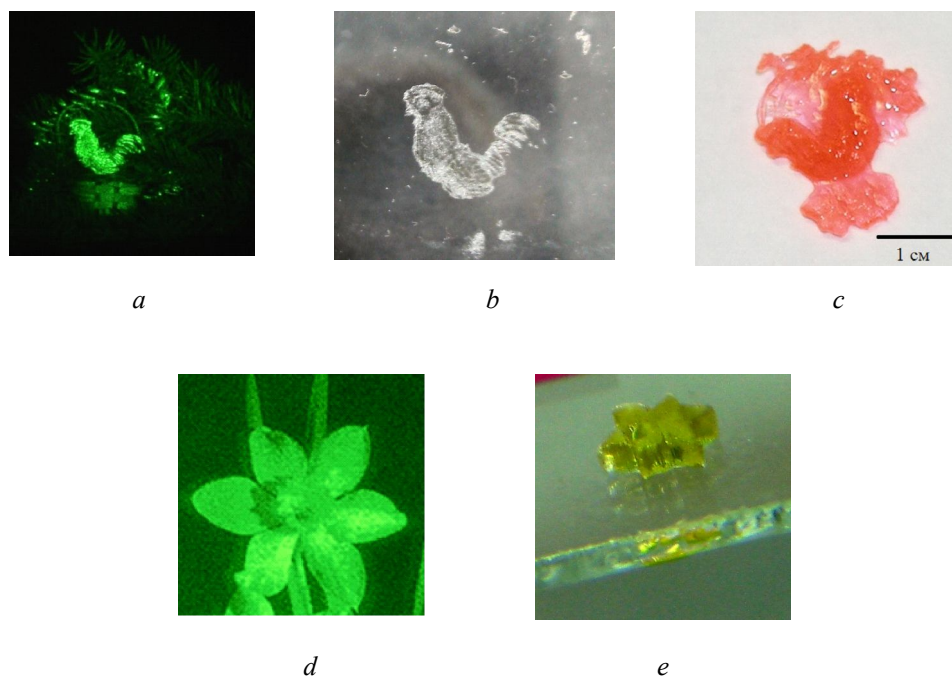


Fig. 2. Examples of polymeric elements (*b, c, e*) and view of the holographic images (*a, d*)

The proposed method combines the capabilities of deep, tone and stereolithography and has the advantage of significantly reducing the complexity of the process. The results can be used for 3D structuring, three-dimensional polymeric elements formation, as well as an original type of fine art.

REFERENCES

1. Liu Xi., Brenner K.-H. Guide structures for spicing single-mode fibres fabricated using deep lithography // *Fibre optics*, 2009. – Vol. 3. – P. 52-54.
2. Jan-Mar Aaron T. Cannistra, Thomas J. Suleski. Characterization of hybrid molding and lithography for SU-8 micro-optical components // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. – 2010. – Vol. 9. – No. 1. – P. 013025.
3. David Dyer, Samir Shreim, Shreshta Jayadev, Valerie Lew, Elliot Botvinick, and Michelle Khinea. Sequential shrink photolithography for plastic microlens arrays // *Applied physics letters*. – 2011. – Vol. 99. – P. 99-102.
4. Maruo S., Jkuta K. Submicron stereo-lithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization. // *Sensors and Actuators*. – 2002. – Vol. 100. – P. 70-76.
5. Selimis A., Mirinov V., Farsari M. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – Vol. 132. – P. 83-89.

ГОЛОГРАММНЫЕ NOTCH-ФИЛЬТРЫ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ЗАЩИТЫ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

Белокопытов А.А.¹, Лукина Т.А.², Сидорова Т.Б.¹, Шигапова Н.М.¹

¹ОАО «Научно-производственное объединение

«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань;

²Université Européenne de Bretagne, Télécom Bretagne, Brest, France)

Источники мощного лазерного излучения широко применяются в обрабатывающей промышленности, средствах связи, навигационных системах, лазерной спектроскопии, голографии, медицинской и специальной технике. В большинстве случаев лазеры являются составной частью комплексов оптико-электронного оборудования, включающего в себя наблюдательные, измерительные приборы, датчики и органы управления.

Актуальной задачей для разработчиков таких комплексов является защита фотоприемных устройств оптико-электронной аппаратуры от ослепляющего и разрушающего воздействия лазерного излучения.

Варианты размещения Notch-фильтров представлены на рис. 1.

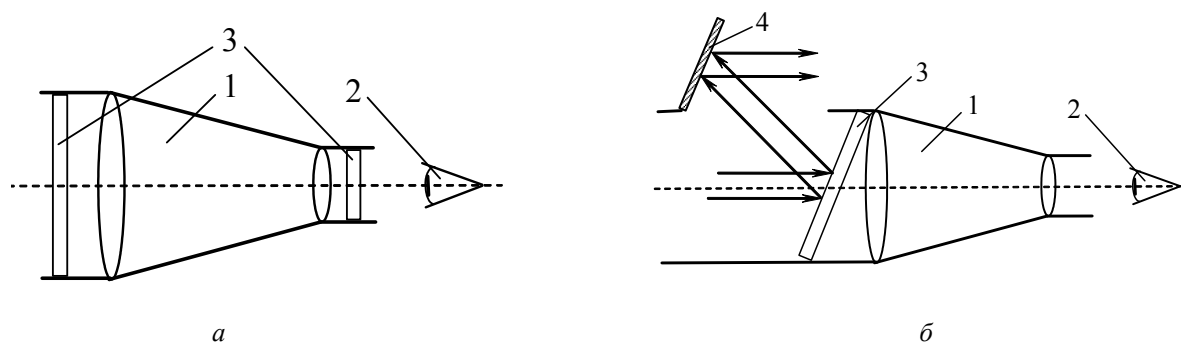


Рис. 1. Варианты размещения защитного фильтра:

a – 1 – объектив оптоэлектронного прибора; 2 – глаз оператора или фотоприемное устройство;

3 – возможные варианты установки защитного фильтра;

б – антибликовый вариант размещения защитного фильтра:

1 – объектив оптоэлектронного прибора; 2 – глаз оператора или фотоприемное устройство;

3 – защитный фильтр; 4 – зеркало

ОАО «НПО ГИПО» обладает технологией, позволяющей разрабатывать и производить голограммные узкополосные фильтры (Notch-фильтры) с высокими техническими характеристиками. Notch-фильтры отражают падающее излучение, а не поглощают его как цветные или фотохромные стекла, что обеспечивает их высокую лучевую стойкость.

Notch-фильтры обладают следующими техническими характеристиками:

Рабочий спектральный диапазон 0,4-1,5 мкм.

Оптическая плотность порядка 4-7.

Полуширина полосы подавления $\Delta\lambda_{1/2} = 5 - 50$ нм.

Пропускание вне полосы подавления ≥ 85 %.

Лучевая прочность не менее 10 Вт/см².

При повороте фильтра в плоскости, перпендикулярной плоскости падения излучения, максимум подавления смещается в коротковолновую область, т.е. возможна плавная перестройка полосы подавления.

Возможно наличие второй гармоники в коротковолновой области, позволяющей использование фильтра в ультрафиолетовой области спектра.

Notch-фильтры могут работать в условиях 100% влажности в диапазоне температур от –60 до +80 °С.

Высокая степень подавления лазерного излучения в рабочей области спектра, высокое пропускание вне полосы подавления и большая крутизна крыльев делают привлекательным применение таких элементов, так как при этом обеспечивается наименьшее искажение цвето-передачи. Типичный график пропускания Notch-фильтра, предназначенного для подавления второй гармоники твердотельного YAG лазера ($\lambda_0 = 532$ нм), представлен на рис. 2.

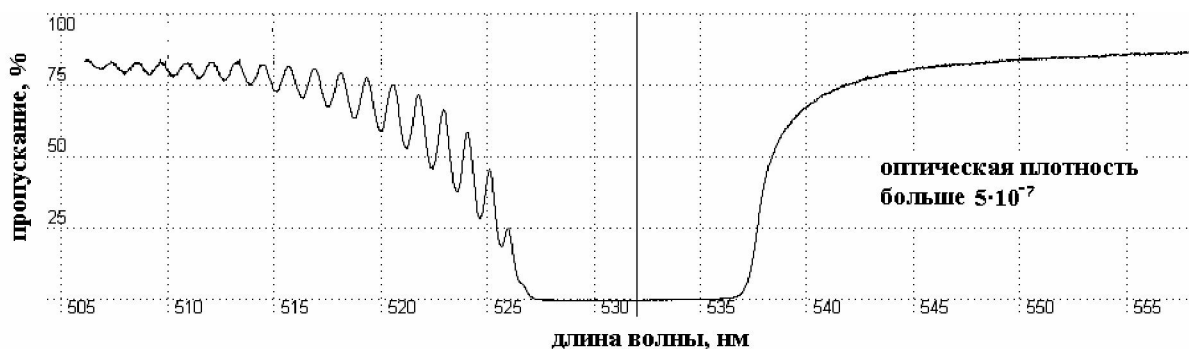


Рис. 2. Спектральная характеристика Notch-фильтра на $\lambda_0 = 532$ нм

Notch-фильтр представляет собой объемную отражательную голограмму, записанную по схеме Денисюка во встречных пучках в светочувствительном слое бихромированного желатина (БХЖ), нанесенном на стеклянную пластинку [1]. В качестве регистрирующей среды используются слои толщиной от 50 до 200 мкм [2, 3]. Для изготовления Notch-фильтров обычно применяются аргоновые лазеры с длиной волны излучения 488 или 514 нм. Экспонирование фотопластинок при регистрации Notch-фильтров осуществляется в специальных иммерсионных кюветах [4,5]. Интерференция падающего и отраженного пучков определенным образом изменяет свойства желатина в объеме фотослоя. Затем, путем специальной обработки, создается система слоев с модулированным коэффициентом преломления, аналогичная слоям в интерференционных фильтрах, получаемых путем вакуумного напыления. Однако модуляция коэффициента преломления Notch-фильтров происходит по закону, близкому к синусоидальному, в отличие от интерференционных фильтров, где изменение коэффициента преломления происходит ступенчато. Такая модуляция обеспечивает большую однородность слоев, повышает предельно достигаемые значения подавления, устраняет паразитные максимумы отражения, снижает уровень рассеянного света. После экспонирования и проявления стеклянные пластинки с получившимися голограммами герметизируются путем заклейки обезвоженным оптическим клеем по всей площади голограммы с использованием соответствующих защитных стекол, что придает изделию высокую стойкость к воздействию механических и климатических факторов.

Накопленный опыт позволяет утверждать, что существует возможность расширения рабочего диапазона Notch-фильтров в ближнюю ультрафиолетовую область спектра вплоть до 350 нм. На этом пути еще достаточно много нерешенных технологических проблем. Для успешного преодоления барьера 400 нм необходимо проведение исследований по следующим направлениям: 1) применение УФ-лазеров для создания высокочастотных периодических структур, 2) отработка специальных методов постэкспозиционной обработки, 3) активация второй гармоники Notch-фильтров, работающих в диапазоне 700-800 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйнов Г.Н., Лукин А.В., Лукина Т.А., Сидорова Т.Б., Скочилов А.Ф. Дифракционные оптические элементы на «толстых» слоях бихромированной желатины. Proc. SPIE, 1997. – Vol. 3317. – P. 178-184.
2. Вендеревская И.Г., Лукина Т.А., Скочилов А.Ф., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры для ультрафиолетовой области спектра. Оптический журнал. – Т. 74. – № 3, 2007. – С. 65-67.
3. Коржакова Л.М., Лопарев А.А., Степанова А.И. Узкополосные голограммные зеркала на незадублированных слоях бихромированного желатина // Оптический журнал, 1994. – № 11. – С. 85-88.
4. Лукина Т.А. Высокоэффективные рельефно- и объемно-фазовые голограммные оптические элементы. Дисс. канд. техн. наук. 01.04.05. Казань, 1999. – С. 94-96.
5. Narrowband hologram filters as an effective means for protecting night vision photodetective devices against high power laser beam exposure. A.A. Belokopytov, G.N. Буоунов, N.M. Shigapova Proc. Of SPIE Vol. 5834. – P. 388-390

NARROWBAND HOLOGRAPHIC FILTERS AS EFFECTIVE MEANS FOR PROTECTING PHOTODETECTING DEVICES AGAINST EFFECTS OF POWERFUL LASER RADIATION

Belokopytov A.A.¹, Lukina T.A.², Sidorova T.B.¹, Shigapova N.M.¹

(¹OJSC Scientific and Production Association;

²Université Européenne de Bretagne, Télécom Bretagne, Brest, France)

Nowadays, one of the principal goals of designers of optical and electronic devices and systems for different applications is search and development of means for protecting photodetecting devices and operators' eyes from the effect of powerful laser radiation. OJSC «NPO GIPO» has at its disposal a narrowband holographic filter (notch filters) technology enabling us to develop unique optical filters and manufacture in serial quantities the standard narrowband holographic filters which possess high technical characteristics.

These filters feature high beam damage threshold and they allow to suppress effectively laser radiation (up to 7 orders) with high transmittance values outside the notch (> 85 %); they may have either one or simultaneously several notches in the region of 0,4-1,5 mm. Notch filters can be made both on plane surfaces and on convex and concave ones with diameters up to 80 mm. Notch filters are recorded upon dichromated gelatine layers according to a counter-propagating scheme.

ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Ларионов Н.П., Агачев А.Р.

(ОАО «Научно-производственное объединение "Государственный институт
прикладной оптики"», г. Казань)

Для контроля асферических поверхностей применяются, в основном, интерферометры типа Тваймана-Грина, в которых в качестве оптического компенсатора используются синтезированные голограммы [1] и линзовые компенсаторы [2]. Оба типа оптических компенсаторов обладают характерной для них особенностью – они вносят в изображение контролируемой зоны асферической поверхности оптической детали искажения в виде дисторсии [3, 4]. В работе [4] рассматривается алгоритм программы учёта дисторсии при построении топографических карт поверхностей внеосевых асферических зеркал, контролируемых с применением линзовых компенсаторов.

В представленной работе рассматривается голографическое устройство для определения положений дефектов (бугров, ям) на зоне асферической поверхности оптической детали, разработанное на основе интерферометра типа Тваймана-Грина с использованием синтезированной голограммы-компенсатора, установленной в его объектной ветви, и двух измерительных сеток ИС1 и ИС2. Эти измерительные сетки снабжены возможностью перемещения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях с возможностью измерения величин их смещения. Каждая измерительная сетка выполнена в виде двух узких прямолинейных штрихов, нанесённых на одну из сторон тонкой плоскопараллельной стеклянной пластинки и пересекающихся между собой под углом 90°. Измерительная сетка ИС1 установлена в осветительной части, а измерительная сетка ИС2 в приемной части интерферометра. При этом плоскости расположения штрихов измерительных сеток ИС1 и ИС2 совмещены с плоскостями промежуточных изображений, соответственно, ППИ1 и ППИ2 зоны асферической поверхности оптической детали. В процессе контроля асферической поверхности точка пересечения штрихов измерительной сетки ИС1 выводится на оптическую ось для визуализации положения этой оси, а точка пересечения штрихов измерительной сетки ИС2 сначала выводится на оптическую ось для определения начала отсчёта для её смещений, а затем совмещается с точками перегиба интерференционной полосы, которые визуализируют положения бугров и ям на контролируемой поверхности. Вследствие этого осуществляется измерение координат точек на контролируемой поверхности, которые соответствуют положению вершин бугров и дну ям на этой поверхности.

Использование измерительных сеток для определения положений дефектов на асферической поверхности исключает влияние дисторсии, вносимой синтезированной голограммой-компенсатором. Это достигается за счёт того, что при контроле асферической поверхности сначала измеряются координаты дефектов в плоскости промежуточного изображения ППИ2 с помощью измерительной сетки ИС2, а затем по *Таблице*, рассчитанной по специальной программе SVAPCG, разработанной в ОАО «НПО ГИПО» Агачевым А.Р., находятся координаты соответствующих им точек на асферической поверхности, в которых присутствуют дефекты – бугор или яма.

Асферическая поверхность задаётся уравнением, записанным в прямоугольной системе координат $oxuz$, ось oz которой совпадает с осью симметрии асферической поверхности, а начало координат o совмещено с вершиной O этой поверхности. Координаты точек в плоскостях промежуточного изображения ППИ1 и ППИ2 записываются в прямоугольной системе координат $o'x'y'z'$, расположенной как в ППИ1, так и в ППИ2. При этом начало координат o' этой системы находится на оптической оси, и каждая из её осей $o'x'$, $o'y'$ и $o'z'$ параллельна, соответственно, осям ox , oy и oz системы координат $oxuz$ и направлена с ней в одну сторону.

Таблица

**Связь координат асферической поверхности
с высотами на голограмме-компенсаторе и с координатами
в плоскости промежуточного изображения ППИ асферической поверхности**

n , номер точки	$y_{\text{ап } n}, (x_{\text{ап } n}), \text{ мм}$	$h_{\text{ГК } n}, \text{ мм}$	$y'_{\text{ППИ } n}, (x'_{\text{ППИ } n}), \text{ мм}$
1	$y_{\text{ап } 1}, (x_{\text{ап } 1})$	$h_{\text{ГК } 1}$	$y'_{\text{ППИ } 1}, (x'_{\text{ППИ } 1})$
2	$y_{\text{ап } 2}, (x_{\text{ап } 2})$	$h_{\text{ГК } 2}$	$y'_{\text{ППИ } 2}, (x'_{\text{ППИ } 2})$
3	$y_{\text{ап } 3}, (x_{\text{ап } 3})$	$h_{\text{ГК } 3}$	$y'_{\text{ППИ } 3}, (x'_{\text{ППИ } 3})$
		.	
		.	
$n_{\text{кон}}$	$y_{\text{ап кон}}, (x_{\text{ап кон}})$	$h_{\text{ГК кон}}$	$y'_{\text{ППИ кон}}, (x'_{\text{ППИ кон}})$

Поскольку данным интерферометром контролируются осесимметричные асферические поверхности, то для определения ординаты y и абсциссы x может использоваться одна и та же *Таблица*. Для её расчёта задают ряд точек, расположенных на профиле асферической поверхности от вершины O до края её светового диаметра с заданным интервалом Δy изменения ординаты y точек этого ряда, и находят с помощью программы SVAPCG для каждого нарастающего от 0 значения ординаты $y_{\text{ап } n}$ величину высоты $h_{\text{ГК } n}$ на голограмме-компенсаторе и ординату $y'_{\text{ППИ } n}$ в плоскостях промежуточного изображения ППИ1 и ППИ2. Поскольку *Таблица* используется и для определения абсциссы $x_{\text{ап } i}$ дефектов контролируемой зоны асферической поверхности, то в столбцах этой *Таблицы* в круглых скобках приведены и выражения для абсцисс выбранных точек на профиле заданной асферической поверхности. При контроле асферической поверхности в процессе анализа этой *Таблицы* находят наиболее близкое значение $y'_{\text{ППИ } n}$ к измеренному $y'_{\text{ППИ } i}$ для выбранной характерной точки i с дефектом на асферической поверхности и определяют соответствующее ему значение $y_{\text{ап } n}$, которое принимают за ординату $y_{\text{ап } i}$ на асферической поверхности. Очевидно, что погрешность найденного таким образом значения $y_{\text{ап } i}$ не превышает половины ширины выбранного шага Δy изменения ординаты y асферической поверхности. Отсюда следует, что погрешность определения ординаты $y_{\text{ап } i}$ тем меньше, чем меньше выбранный шаг Δy изменения ординаты y при расчёте значений для столбцов *Таблицы*. На практике для Δy можно задавать значение меньше 1 мм; поэтому погрешность определения ординаты $y_{\text{ап } i}$ дефекта на асферической поверхности будет составлять доли миллиметра. Поскольку в рассмотренном интерферометре могут быть использованы высокоточные датчики линейных перемещений измерительных сеток ИС1 и ИС2, а шаг Δy при расчёте значений для *Таблицы* может быть выбран достаточно малым (десятью долей миллиметра и даже меньше), то данный интерферометр обеспечивает контроль положений дефектов на асферических поверхностях второго и более высоких порядков с высокой точностью.

Работоспособность устройства проверена при контроле ряда вогнутых и выпуклых асферических поверхностей второго и высших порядков оптических деталей, изготовленных в ОАО «НПО ГИПО». Практика работы на этом устройстве показала, что оно обеспечивает достаточную точность контроля асферических поверхностей. При этом устройство обеспечивает контроль положений дефектов (ям, бугров) на рабочей зоне асферической поверхности при её формообразовании как на начальной стадии полировки с присутствием больших дефектов на поверхности, так и на конечной стадии её доводки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Ньюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А. Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. – Т. 69, № 12, – С. 23-32.

2. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., «Машиностроение», 1976. – 262 с.

3. Лукин А.В., Рафиков Р.А., Топоркова И.А. Расчет допусков и оптимизация голографических схем контроля асферических поверхностей // ОМП, 1981, № 4. – С. 53-59.

4. Горшков В.А., Кутвицкий В.А., Савельев А.С. Компенсация дисторсионных искажений при интерференционном контроле внеосевых асферических поверхностей с применением нуль-корректоров // Оптический журнал, 2011. – Т. 78, № 4. – С. 51-55.

HOLOGRAPHIC EXTENDED-PRECISION FACILITY FOR CONTROLLING ASPHERICAL SURFACES

Larionov N.P., Agachev A.R.

(OJSC «Scientific and Production Association "State Institute of Applied Optics"», Kazan)

The paper deals with a holographic facility using a Twyman-Green interferometer for controlling the axisymmetrical aspherical surfaces. It includes a computer-generated hologram-compensator, located in the object branch of the interferometer, and two measuring grids *IS1* and *IS2*, located in a lighting and a receiving branch of the interferometer, correspondingly. Measuring grid *IS1* is used to visualize the optical axis of the interferometer, and measuring grid *IS2* is used to determine the coordinates of the defect positions (hills, pits) on the target surface. The use of measuring grids for the control process allows to cancel distortion, caused by the hologram-compensator in the image of the target zone of the aspherical surface, thus improving the surface inspection precision. The facility provides for controlling the defect positions (hills, pit) in the operative zone of the aspherical surface both at the initial stage of its polishing, with substantial defects being available thereupon, and at the final stage of its finishing.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОСНОВАМ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ И ГОЛОГРАФИИ

Лукин А.В.¹, Мельников А.Н.¹, Павлычева Н.К.², Саттаров Ф.А.¹, Шигапова Н.М.¹

¹ОАО «Научно-производственное объединение

«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань;

²Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Учебно-методический лабораторный комплекс (УМЛК) «Основы дифракционной оптики и голографии» разработан совместно специалистами Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) и ОАО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (ОАО «НПО ГИПО») по Государственному контракту № 02.740.11.0557 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. в рамках Научно-образовательного центра «Дифракционная и асферическая оптика» в 2010-2011 гг. Этот оригинальный многоуровневый комплекс позволяет выпускникам учебных заведений преодолеть разрыв между получаемыми знаниями в области дифракционной оптики и голографии и квалификационными требованиями, предъявляемыми современным наукоемким оптико-электронным производством.

Патентно-информационный поиск показал, что в рекламных изданиях и каталогах конкурирующих отечественных и зарубежных разработчиков и изготовителей технических средств обучения и учебных комплексов в области физики и оптики (например, Томский государственный университет совместно с ООО «ОПТИКОН», г. Томск; РНПО «Росучприбор», г. Москва; Инновационный центр «ВЛАДИС», г. Москва; Научно-производственный институт-предприятие «Учебная техника и технологии» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск; фирма «DIDA CONCEPT», г. Париж, Франция; фирма «3B ScientificT», г. Гамбург, Германия) крайне мало представлены технические средства обучения с применением дифракционных оптических элементов [1 – 6]. Это выявленное обстоятельство увеличивает педагогическую значимость разработанного УМЛК, в состав которого входят:

1. Учебно-методический материал, включающий в себя теоретический материал и лабораторный практикум [7].

2. Приборная часть:

- универсальная монтажная плита (несколько вариантов исполнения);
- держатели и юстировочные узлы (фирм «Standa», «THORLABS»), а также специализированные узлы для отдельных оригинальных работ;
- источники излучения (лазерные диоды с рабочими длинами волн 403 и 660 нм, твердотельный лазер с рабочей длиной волны 532 нм; «белый» светодиод; ртутно-гелиевая лампа);
- оптические и вспомогательные элементы в оправках (объективы, расширители, поворотные зеркала, щели, непрозрачные экраны и др. элементы), дополнительные измерительные устройства;
- комплект голограммных оптических элементов (ГОЭ) в четырех модификациях, которые могут применяться на довузовском, вузовском и послевузовском уровнях подготовки;
- ноутбук; цветная цифровая видеокамера модели VEC-245 с блоком питания и USB-выходом; цифровой микроскоп модели «Эксперт»; фотоприемник модели МИРС-1;
- защитные очки от лазерного излучения (фирмы «Standa»); модели очков – STL-2145G, STL-2148G, STL-2114G на синюю, зеленую и красную области спектра соответственно.

Основу УМЛК составляет комплект ГОЭ, полученных с помощью современных технологий и адаптированных для учебного процесса. Комплект ГОЭ состоит из 24 элементов и включает в себя две большие группы:

физические ГОЭ, к которым относятся: плоские пропускающая и отражательная голограммные дифракционные решетки (ГДР); отражательная вогнутая голограммная дифракционная решетка (ВГДР); физическая голограмма Денисюка; физическая голограмма Лейта; физический голограммный «наложенный» линзовый растр; узкополосный голограммный фильтр (Notch-фильтр); плоская пропускающая ГДР-светоделитель; плоский ГДР-поляризатор;

синтезированные ГОЭ; к ним относятся: синтезированная голограммная линза (СГЛ); цилиндрическая синтезированная голограммная линза (ЦСГЛ); СГЛ-тор; синтезированный голограммный растр; синтезированный голограммный имитатор (СГИ) сферической аберрации 3 и 5-го порядков; СГИ сферической аберрации 5-го порядка; СГИ аберраций синусоидального вида.

Лабораторный практикум включает в себя работы по следующим темам:

Сравнение свойств физического голограммного растра с синтезированным голограммным растром;

Демонстрация свойств голограммы Денисюка;

Изучение свойств Notch-фильтра;

Изучение свойств плоской пропускающей ГДР;

Демонстрация свойств физической голограммы Лейта;

Изучение свойств ЦСГЛ;

Изучение интерференции света;

Измерение коэффициента подавления Notch-фильтра;

Исследование хроматических аберраций СГЛ;

Моделирование монохроматических аберраций с помощью СГИ;

Исследование качества изображения спектроскопа;

Изучение свойств ВГДР;

Исследование спектральной селективности Notch-фильтров в схеме спектрального прибора;

Оценка дифракционной эффективности отражательных дифракционных решеток;

Изучение вращения плоскости поляризации оптически активными веществами;

Изучение явления преломления и отражения света (формулы Френеля).

К настоящему времени УМЛК успешно применяется в нескольких российских ВУЗах – Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики, Московском государственном университете геодезии и картографии, Волгоградском государственном университете, Самарском государственном аэрокосмическом университете им. академика С.П. Королева (национальном исследовательском университете), Казанском государственном энергетическом университете, Ижевском государственном техническом университете, Казанском государственном медицинском университете Минздрава России, в том числе на кафедре оптико-электронных систем КНИТУ-КАИ, для учебных и исследовательских задач. В частности, элементы УМЛК были использованы при подготовке ряда выпускных работ бакалавров. Выполнение двух дипломных проектов, посвященных изучению свойств ЦСГЛ и контролю асферических поверхностей с помощью синтезированных голограммных компенсаторов, способствовали расширению функциональных возможностей УМЛК. Установка с ВГДР применена для проведения научных работ магистров в рамках курса «Оптические методы и приборы для научных исследований». В рамках подготовки кандидатской диссертации использован Notch-фильтр для подавления излучения лазерного источника в компактной установке для исследования спектров рассеяния Рамана углеродных нанотрубок.

В заключении следует отметить следующие принципиальные положения:

– созданный УМЛК не только формирует у обучаемых набор требуемых компетенций, позволяет познать законы оптических явлений и привить навык к макетированию оптических и оптико-электронных приборов, но и познакомиться с основами технологий получения физических и синтезированных ГОЭ (реализуется синергия оптического инженерного образования «оптик-физик – оптик-конструктор – оптик-технолог»);

– комплектация УМЛК является гибкой, открытой для инноваций и может быть сформирована под индивидуальные требования Заказчика;

– приведенный выше перечень лабораторных работ может быть расширен за счет использования практических возможностей имеющегося комплекта ГОЭ и за счет введения в состав УМЛК новых ГОЭ, которые могут быть разработаны и изготовлены как на технологической базе ОАО «НПО ГИПО», так и в кооперации с другими изготовителями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томский государственный университет совместно с ООО «ОПТИКОН», г. Томск. Рекламные материалы. Учебно-методический комплекс для экспериментов по оптике «УМОГ-3».

2. РНПО «Росучприбор», г. Москва. Рекламные материалы. Комплект оборудования для демонстрационного эксперимента по волновой оптике.

3. ООО «Инновационный центр «ВЛАДИС». Каталог: Естественнонаучный практикум по физике, раздел «Оптика», г. Москва. <http://vladis-lab.ru>.

4. Научно-производственный институт-предприятие «Учебная техника и технологии» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Рекламные материалы. Типовые комплекты учебного оборудования и наглядных пособий по разделам «Оптика» и «Оптика и голография».

5. Фирма «DIDA CONCEPT», г. Париж, Франция. Каталог: Pactical Works. <http://didaconcept.com>.

6. Фирма «3B ScientificT», г. Гамбург, Германия. Каталог: Комплект учебного оборудования по теме изучения «Свет и оптика». <http://3bscientific.ru>.

7. Вендеревская И.Г., Лукин А.В., Мельников А.Н. и др. Основы дифракционной оптики и голографии: учебное пособие / Под ред. Н.К. Павлычевой. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – 188 с.

EDUCATIONAL AND METHODOLOGICAL LABORATORY COMPLEX ON THE BASICS OF DIFFRACTION OPTICS AND HOLOGRAPHY

Lukin A.V.¹, Melnikov A.N.¹, Pavlycheva N.K.², Sattarov F.A.¹, Shigapova N.M.¹

(¹OJSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan;

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan)

The paper deals with the educational and methodical laboratory complex “Basics of diffraction optics and holography”, developed according to State Contract No. 02.740.11.0557.

This laboratory complex is based on a set of original holographic optical elements. It includes diffraction gratings, narrowband filters, computer-generated and physical holograms. This multi-level educational and methodical laboratory complex allows graduates of educational establishments to bridge the gap between the knowledge, obtained in the field of diffraction optics and holography, and qualification requirements made by modern science intensive opto-electronic industry.

The paper presents the composition and main technical characteristics of this educational complex, a main list of laboratory works and examples of educational stands.

To date, this complex has been successfully used in several Russian universities. The paper describes some experience in the use of the above complex, including the experience gained at the Chair of the optical and electronic systems of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI.

The composition of the educational and methodical laboratory complex is rather flexible and it may be customized.

ИНТЕРФЕРОМЕТР ФИЗО С ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭТАЛОННЫМИ СФЕРАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Полещук А.Г., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н.

*(Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск;
ЗАО «ДИФРАКЦИЯ», г. Новосибирск)*

Введение

Интерферометры для контроля оптики появились почти 100 лет назад и сразу стали наиболее точными измерительными инструментами, так как их базовый принцип основан на использовании длины волны светового излучения в качестве единицы измерения (~0,5 мкм). Сегодня известно много типов интерферометров, но наибольшей простотой, компактностью и точностью отличается интерферометр Физо (ИФ), схема которого основана на общем ходе световых пучков вплоть до эталонной поверхности. В настоящее время серийно выпускается много типов таких приборов [1]. В классических ИФ эталонные поверхности – это высококачественные пластины или сферы (мениски). С помощью этих эталонов контролируются практически любые оптические детали с поверхностями плоской или сферической формы, причем погрешность контроля составляет сотые доли длины волны или единицы и доли нанометров.

Для контроля асферической оптики широко используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) – корректоры волнового фронта, которые представляют собой оптическую подложку, одна сторона которой содержит дифракционную структуру, выполненную, обычно, в виде микрорельефа поверхности. ДОЭ преобразуют сферический волновой фронт на выходе ИФ в асферический, который корригирован с формой контролируемой асферической поверхности. Однако точность такого метода всегда меньше, чем точность контроля плоских или сферических поверхностей. Это обусловлено, в частности, тем, что такой ДОЭ не входит в общий ход световых пучков ИФ и, следовательно, погрешность его подложки складывается с результатом измерения. Этот вклад особенно существенен, когда размеры подложки велики, например, при контроле светосильных астрономических зеркал. Также, существенную роль играет точность юстировки ДОЭ относительно ИФ и контролируемой поверхности. Для точной юстировки обычно используют вспомогательный автоколлимационный ДОЭ, выполненный в виде кольца, вне зоны основного элемента. Вспомогательный ДОЭ должен иметь достаточный размер, чтобы обеспечить точность юстировки в единицы угл. сек. Очевидно, что при этом область основного ДОЭ сокращается.

Одним из путей устранения указанных недостатков является применение так называемых «комбинированных ДОЭ» (КД) [2]. Такие КД позволяют формировать два и более независимых волновых фронта одним ДОЭ. В приложении к ИФ, один волновой фронт КД является измерительным, а второй опорным. В этом случае, отпадает необходимость в эталоне, так как опорный фронт и является эталонным. Ранее было показано [3], что КД, формирующий сферический опорный волновой фронт, обеспечивает погрешность измерения мене 1/20 длины волны при погрешности подложки свыше двух длин волн.

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследования нового ИФ [4] с эталонным КД работающим в параллельном пучке света [5]. Показано, что использование параллельного пучка света позволяет упростить дифракционный корректор, отказавшись от вспомогательного ДОЭ. Предложенный ИФ сочетает в себе функции интерферометра и фотоэлектрического автоколлиматора, что позволяет с высокой точностью проводить юстировку эталонного КД без применения вспомогательного ДОЭ и, в перспективе, автоматизировать

процесс настройки. В предложенной схеме, подложка эталонного КД включена в общий ход световых пучков и ее неоднородности не влияют на точность измерения.

Эталонный комбинированный ДООЭ (ЭКД)

Дифракционная эталонная сфера (или ЭКД) выполнена в виде клиновидной оптической пластины 1 с поверхностным слоем, содержащим рельефную дифракционную структуру 2 (рис. 1). Поверхностный слой выполнен в виде либо одной, либо нескольких, лежащих друг на друге, тонких оптических пленок. Входное оптическое излучение I_0 с плоским волновым фронтом проходит оптическую подложку 1 и разлагается на m дифракционных порядков на дифракционной структуре 2 с периодом T . Оптическое излучение в дифракционном порядке $m = +1$ образует сходящийся сферический (или асферический) волновой фронт 3 и фокусируется, например, в точке O_1 . Этот волновой фронт служит эталоном для контроля поверхности, например, линзы 4. Оптическое излучение отражается от этой поверхности, снова проходит дифракционную структуру, испытывая дифракцию, и формирует измерительный волновой фронт $I_{из}$. Часть входного оптического излучения отражается стороной оптической пластины 1, на которой имеется дифракционная структура.

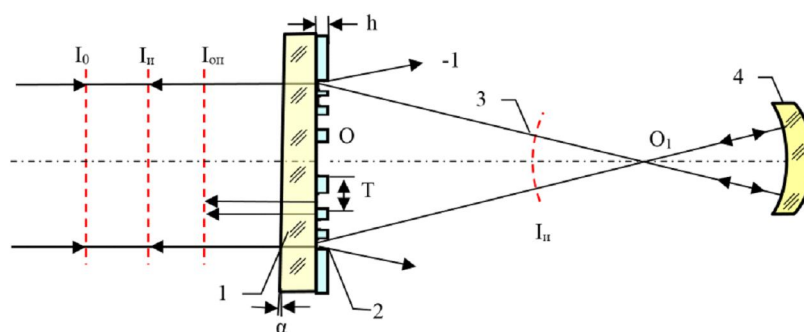


Рис. 1. Оптическая схема ЭКД

Так как сторона пластины 2 имеет хорошую плоскостность (отклонение от плоскостности менее $1/20$ - $1/100$ длины волны), то отраженное оптическое излучение будет иметь плоский волновой фронт $I_{оп}$. Этот волновой фронт является опорным (эталонным). Глубина рельефа определяется как $h = N\lambda/2n$, где $N = 0, 1, 2, 3...$. Оптимальная величина N находится как $N = \text{ROUND}(n/(n-1))$, где ROUND – функция округления до ближайшего целого. Например, при $\lambda = 632$ нм, $n = 1,46$, $N = 3$, оптимальная глубина рельефа зон будет $h_{опт} = 0,65$ мкм. Для сравнения, максимальная дифракционная эффективность достигается при: $h_m = \lambda/2(n-1) = 0,68$ мкм. Таким образом, пластина с дифракционной структурой глубиной $h_{опт}$ выполняет одновременно роль светоделиителя и формирователя сферического (или асферического) волнового фронта. Подложка 1 включена в общий ход измерительного и опорных пучков света и ее погрешности не влияют на точность измерения.

Интерферометр Физо с ЭКД

Упрощенная оптическая схема интерферометра с ЭКД приведена на рис. 2. Оптическое излучение от точечного источника S (одночастотного лазера) направляется светоделителем $СД$ к коллимирующему объективу O_1 . Оптическое излучение проходит ЭКД (рис. 1) и, далее, поступает к контролируемой детали КД. Плоскости ЭКД и контролируемой детали создают автоколлимационный ход пучков. Оптическое излучение, отраженное от поверхности ЭКД с дифракционной структурой (опорный пучок) и контролируемой детали (измерительный пучок) снова проходит объектив O_1 , светоделиТЕЛЬ $СД$ и фокусируется (точка S_2) в плоскости диафрагмы $Д$, которая установлена под небольшим углом α_k к оптической оси.

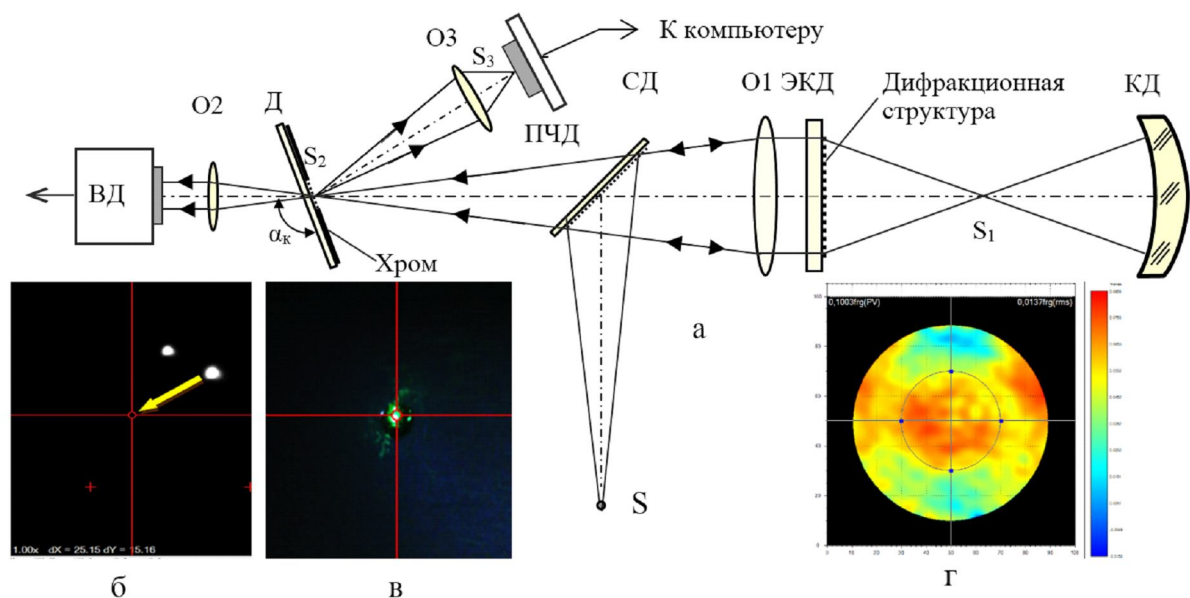


Рис. 2. Оптическая схема ИФ с ЭКД (а), положения автоколлимационных пятен при настройке (б, в) и пример фазовой карты оптической детали (г)

Прошедшие диафрагму световые пучки проецируются объективом О2 в плоскость основной видеокамеры, которая сопряжена с плоскостью КД. Диафрагма Д совмещена с вторым светоделителем. Непрозрачное покрытие диафрагмы Д (например, пленка хрома) нанесено на внешнюю по отношению объективу О2 сторону. В центральной части этого светоделителя (отверстие диафрагмы) диаметром L_m непрозрачное покрытие отсутствует. Часть оптического излучения отражается от этой области и проецируется объективом О3 в плоскость позиционно-чувствительного детектора (ПЧД). В качестве ПЧД может быть использована видеокамера. При правильной настройке интерферометра основная видеокамера регистрирует интерференционную картину (и, соответственно, фазовую карту, см. рис. 2, г), а ПЧД регистрирует и вычисляет положение автоколлимационных пятен, как показано на рис. 2, б.

Плоскость дифракционной структуры 2 (рис. 1) должна устанавливаться параллельно плоскости входного оптического излучения I_0 с погрешностью в единицы угл. сек. Для этого, на первом этапе, проводится калибровка ПЧД, например, с помощью уголкового отражателя и положение центра (перекрестье креста на рис. 2 б, в) фиксируется как начало координат. Далее в процессе настройки непрерывно вычисляется координаты центра автоколлимационного пятна и его расстояние от начала координат. Таким образом, в ИФ введена функция цифрового автоколлиматора. Данное техническое решение реализовано в новой модификации интерферометра ФТИ-100-GbE [6].

Заключение

Представлены результаты разработки и исследования нового ИФ с эталонным дифракционным корректором, работающим в параллельном пучке света. Использование параллельного пучка света позволило отказаться от вспомогательного ДОЭ. Предложенный ИФ сочетает в себе функции интерферометра и фотоэлектрического автоколлиматора, что позволяет с высокой точностью проводить юстировку эталонного КД и автоматизировать процесс настройки. В предложенной схеме подложка эталонного КД включена в общий ход световых пучков и ее неоднородность не влияют на точность измерения.

Данная работа поддержана междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.rp-photonics.com/bg/buy_interferometers.html?s=vbox
2. *Asfour J-M., Poleshchuk A.G.* Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram // *JOSA A*, 23, N 1. – 172-178 (2006).
3. *Poleshchuk A.G., Nasyrov R., Asfour J-M.* Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces // *Optics Express*, 17, Issue 7, 5420-5425 (2009).
4. Патент РФ № 147271. Интерферометр для контроля формы и углового положения оптических поверхностей. Автор: А.Г. Полещук и В.Н. Хомутов. Опубл. 27.10.2014.
5. Патент РФ № 2534435. Эталонный дифракционный оптический элемент (Варианты). Автор: А.Г. Полещук. Опубл. 27.11.2014.
6. *Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н.* Лазерный интерферометр ФТИ-100 // Сборник трудов Научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013», конференция «СибОптика-2013» г. Новосибирск, 2013. – С. 25-31.

FIZEAU INTERFEROMETER WITH DIFFRACTIVE TRANSMISSION SPHERES FOR TESTING ASPHERICAL SURFACES

Poleshchuk A.G., Matochkin A.E., Cherkashin V.V., Khomutov V.N.

*(Institute of Automation and Electrometry SB of RAS, Novosibirsk;
JSC «DIFFRACTION», Novosibirsk)*

Results of the research and development of the new Fizeau interferometer (FI) with diffractive transmission spheres (DTS) operating in collimated light beam are presented. It was shown that the use of the parallel light beam allows to refuse auxiliary computer generated hologram (CGH). Proposed FI combines the functions of digital autocollimator and the interferometer, which allow to make the adjustment of the reference DTS with high accuracy and to automate the adjusting process. An experimental study was made on the base of the new modification of the interferometer FTI-100-GbE.

ГОЛОГРАММНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ В ДВОЙНОМ МОНОХРОМАТОРЕ

Белокопытов А.А., Муслимов Э.Р., Скочилов А.Ф.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

Двойной монохроматор [1] является средством получения оптического излучения с узким спектральным контуром на произвольной длине волны внутри рабочего спектрального диапазона при низком уровне рассеянного света. Применение двойного монохроматора в качестве самостоятельного средства измерения позволяет решать широкий круг актуальных научно-технических задач в следующих областях:

спектральные измерения в УФ области спектра,
флуоресцентная, рамановская спектроскопия,
измерение поглощения и пропускания,
фильтрация излучения с узкой спектральной полосой пропускания и сильным подавлением паразитного света.

В ОАО «НПО ГИПО» разработан малогабаритный автоматизированный двойной монохроматор со сложением дисперсий для обеспечения измерений оптических характеристик оптико-электронных приборов и аппаратуры в области спектра 200-400 нм со следующими техническими характеристиками.

Параметр	Значение
Рабочий спектральный диапазон, нм	200-400
Относительное отверстие	1/4.2
Спектральное разрешение, нм	0.16-0.24
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	1.6-2.1
Точность установки длины волны, нм	± 0.1
Частота решеток в центре, лин/мм	2355,2
Дифракционная эффективность решеток для $\lambda=300$ нм не менее, %	40
Ширина щелей, мм	регулируемая 0-2
Управление	от встроенного контроллера, внешнее управление от ПК, интерфейс USB2.0
Питание, В	220
Габаритные размеры прибора, мм	не более 450x450x250
Масса, кг	не более 10

Двойной монохроматор – спектральный прибор, состоящий из двух монохроматоров, последовательно состыкованных таким образом, что выходное излучение первого монохроматора является входным излучением второго монохроматора. Двойной монохроматор со сложением дисперсий при большей теоретической разрешающей способности обеспечивает устранение рассеянного света, а при достаточно высоком пропускании может оказаться и более светосильным, чем простой монохроматор. Для реализации этих преимуществ необходимы более жесткие требования к исправлению аберраций и особенно – к механизму сканирования спектра.

Вогнутые дифракционные решетки, применяемые в качестве диспергирующих элементов двойного монохроматора, обладают астигматизмом, снижающим их реальную светосилу. Компенсация астигматизма вогнутых решеток может достигаться созданием системы криволинейных штрихов с переменным периодом. Наиболее пригодны решетки II, III и IV типа по

распространенной классификации фирмы Jobin Yvon. Основными методами изготовления дифракционных решеток в настоящее время являются голографический и нарезной.

Нарезные дифракционные решетки изготавливаются путем нарезки алмазным резцом системы штрихов в тонком металлическом слое (алюминий, золото). Нарезка выполняется на прецизионной делительной машине, при строгом соблюдении температурной стабильности и виброизоляции. Нарезные решетки, как правило, имеют несколько большую (относительно голограммных) дифракционную эффективность, но создают больше рассеянного света, характеризуются наличием ложных спектральных линий – «духов», кроме того, при изготовлении имеют место существенные ограничения по размерам рабочей зоны и частоте штрихов.

Голограммные решетки изготавливаются путем регистрации интерференционной картины в фоточувствительном слое. Они лишены перечисленных выше недостатков и существенно более технологичны.

Для разработанного двойного монохроматора голограммные решетки имеют следующие параметры записи: длина волны лазера 441,6 нм, координаты точечных источников (228,931 мм, 1,25944 рад) и (175,109 мм, -0,08825 рад). Угол отклонения главного луча равен 39° для любой длины волны, что обеспечивается синхронным разворотом решеток. Идентичность дифракционных решеток обеспечивается копированием с одной решетки-матрицы.

Дифракционная эффективность (ДЭ) решетки, определяемая как отношение потока энергии монохроматического света, дифрагированного в рабочий порядок дифракции m , к потоку энергии падающего на решетку излучения, зависит как от материала отражающего слоя, так и формы профиля штрихов решетки. Зависимость ДЭ решеток двойного монохроматора от длины волны падающего на них неполяризованного оптического излучения была исследована для двух типов профиля штрихов (синусоидального и треугольного) и различных материалов отражающего слоя (золото, серебро и алюминий) на основе строгого решения уравнений Максвелла численными дифференциальными методами.

Дифракционные решетки, используемые в двойном монохроматоре, работают таким образом, что угол падения θ главного луча зависит от длины волны λ выделяемого монохроматического излучения, причем эта зависимость обеспечивает постоянство угла между падающим и дифрагированным в рабочий порядок лучами. Поскольку ДЭ решетки зависит от угла падения на неё оптического излучения, то при расчете ДЭ для заданной длины волны λ необходимо учитывать зависимость $\theta(\lambda)$.

Анализ результатов расчета ДЭ показывает, что решетки с отражающим слоем из серебра обладают крайне неравномерной зависимостью ДЭ от длины волны для любой формы профиля штрихов, поэтому использовать серебро в качестве материала решетки в данном диапазоне длин волн нецелесообразно.

Решетки с золотым отражающим покрытием дают максимально равномерную зависимость ДЭ от длины волны для любой формы профиля штрихов, но имеют максимальную ДЭ не более 25 %.

Решетки с отражающим слоем из алюминия являются наиболее подходящими для использования в двойном монохроматоре. При этом, если решетка является голографической, то оптимальным будет синусоидальный профиль штрихов (ДЭ порядка 40 % для $\lambda = 300$ нм), а если можно использовать нарезную решетку, то лучшим будет треугольный профиль штрихов (ДЭ порядка 70% для $\lambda = 300$ нм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

HOLOGRAPHIC GRATINGS IN A DOUBLE MONOCHROMATOR

Belokopytov A.A., Muslimov E.R., Skochilov A.F.

(OJSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan)

The paper reviews the possibilities of using a holographic grating in a double monochromator for the ultraviolet covering the wavelength region from 200 nm to 400 nm. It provides some results about the calculation of monochromator spectral characteristics and that of gratings diffraction efficiency.

Generally, ruled gratings feature a diffraction efficiency which is somewhat higher (as compared with that of holographic gratings), but they produce more scattered light and ghost lines. Furthermore, there are considerable limitations on the ruled area and groove density. Holographic gratings are made by recording an interference pattern on a photosensitive layer. They do not have the above disadvantages and, essentially, they are more manufacturable.

The dependence of the diffraction efficiency of gratings in a double monochromator on the wavelength of the incident nonpolarized optical radiation was studied for the case of two types of groove profiles (sinusoidal and triangular profile shapes) and various materials (gold, silver and aluminium) used in a reflecting layer on the basis of a rigorous solution of the Maxwell equations by numerical differential methods.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ВРАЩЕНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ

Скиданов Р.В.^{1,2}, Ганчевская С.В.^{1,2}

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

² Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Предложен метод контролируемого вращения микрообъектов в некольцевых вихревых световых полях, сформированных с помощью вихревых аксионов. В натурном эксперименте осуществлен поворот группы 4-5 полистироловых микрочастиц диаметром 5 мкм.

Вихревые световые пучки используются при передаче информации [1], в системах оптического контроля [2], в оптическом микроманипулировании [3, 4]. При этом наличие орбитального углового момента предопределило использование оптических вихревых пучков, прежде всего, для вращения микрообъектов. Суперпозиция вихревых пучков в общем случае имеет сложную структуру распределения интенсивности [5, 6] (в общем случае некольцевую). Но существуют световые пучки, имеющие более сложную структуру [7, 8], в виде замкнутых световых линий.

В настоящей работе для задачи вращения микрообъектов формируется суперпозиция вихревых пучков с топологическими зарядами $n=6$, $m_1=2$, $m_2=6$ (рис. 1, а-в) и $n=0$, $m_1=7$, $m_2=-5$, $m_3=7$, $m_4=7$ (рис. 1 г-е).

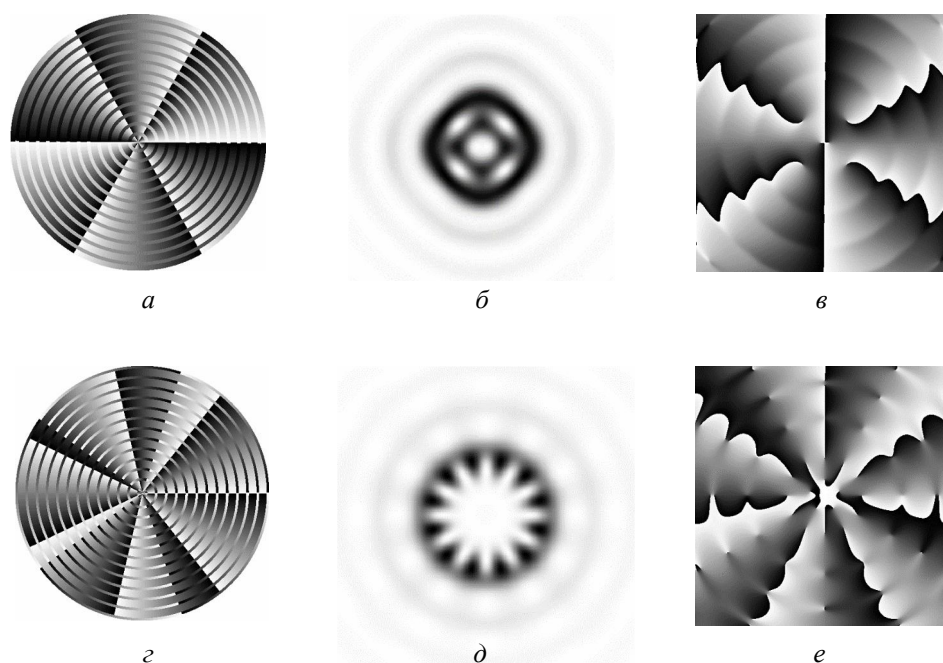


Рис. 2. Фазовая функция ДОЭ (а, г), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б, д), фаза пучка (в, е)

Несмотря на сложную форму пучка на рис. 1, д, движение частиц происходит по внешнему и кольцу. Однако у световых ловушек на рис. 1, б, д много способов использования – вращение не только микрочастиц и бактерий, но и более сложных объектов, например, микротурбин.

Для проверки возможности вращения микрообъектов в сложных вихревых пучках был проведён ряд экспериментов. На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки. Пучок был сфокусирован на микрочастицах полистирола диаметром 5 мкм, расположенных внутри капли дистиллированной воды на поверхности стеклянной подложки. Для перемещения платформы с установленной на ней кюветой использовалась система из двух шаговых двигателей, которая позволяла перемещать платформу с шагом 0,5 мкм.

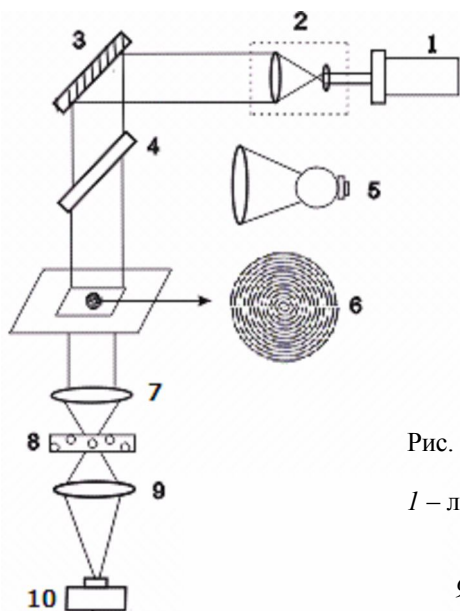


Рис. 3. Оптическая схема эксперимента по захвату полистироловых микрообъектов в пучке:

1 – лазер; 2 – коллиматор; 3, 4 – поворотные зеркала; 5 – подсветка;
6 – аксикон; 7 – фокусирующий микрообъектив (16×);
8 – подложка с микрочастицами;
9 – изображающий микрообъектив (32×); 10 – CCD-камера

На рис. 4 представлены различные стадии процесса перемещения полистироловых частиц в пучке, представленном на рис. 1, б. При разной фокусировке микрочастицы попадают в области, соответствующие разному знаку орбитального углового момента пучка и поворачиваются на фиксированный угол до попадания в ближайший максимум.

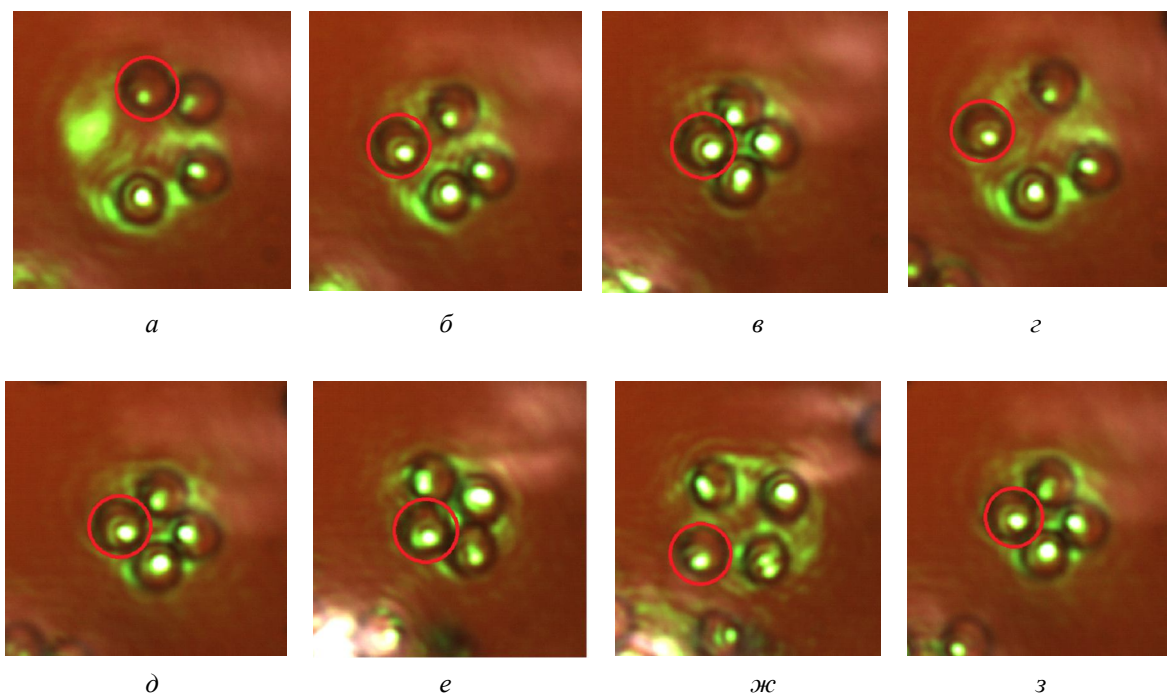


Рис. 4. Стадии поворота полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 2 с

В результате натурального эксперимента был осуществлен захват частиц полистирола и инициирован поворот группы частиц за счет фокусировки и разфокусировки светового пучка.

На рис. 5 представлены различные стадии процесса перемещения полистироловых частиц по кольцу, снятые с интервалом 2 с.

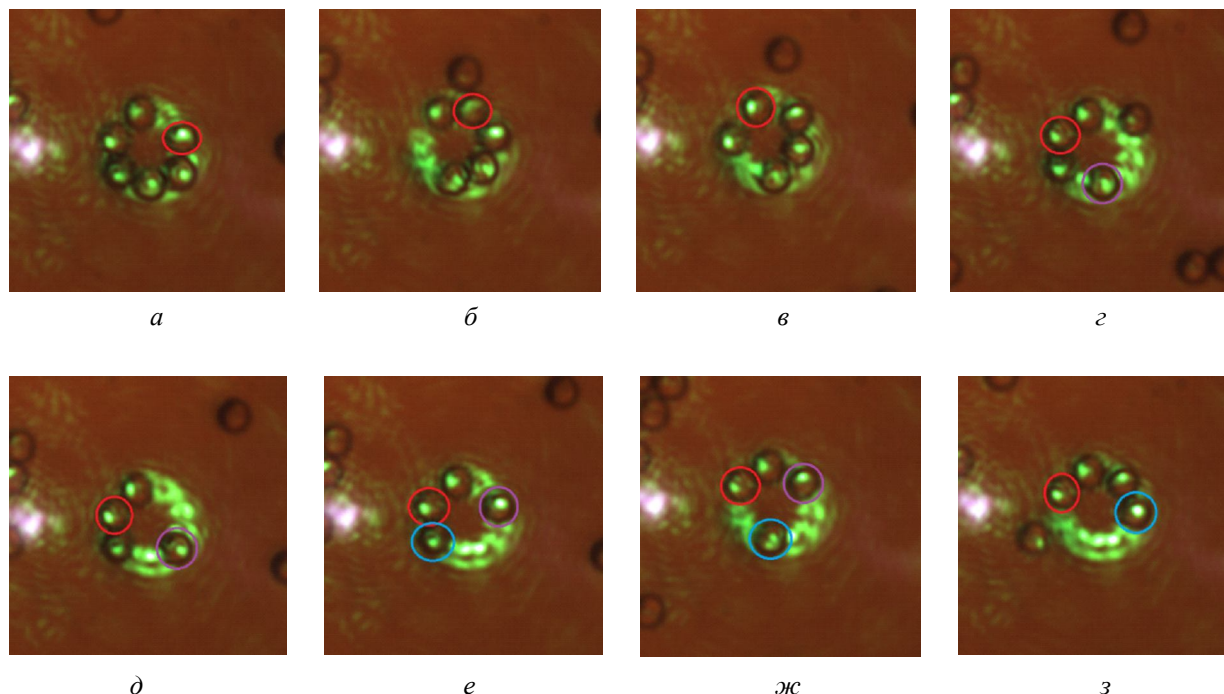


Рис. 5. Стадии процесса микроманипуляции полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 2 с

Как видно из рис. 4, 5, наблюдается поворот группы микрочастиц в пучках, обладающих существенно неколецевой структурой. При этом на рис. 4 поворот осуществляется в разные стороны, в зависимости от фокусировки.

Заключение

Описаны световые пучки, на основе суперпозиции вихревых световых пучков с разными топологическими зарядами. Представлены результаты экспериментов, доказывающие возможность контролируемого поворота группы микрочастиц в таких световых пучках. Показано, что при наличии в суперпозиции вихревых пучков с разным знаком топологического заряда возможен разнонаправленный поворот группы микрочастиц в зависимости от фокусировки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 14-31-00014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bai, N. Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier / N. Bai, Ezra Ip, Y. Hang, E. Mateo, F. Yaman, M. Li, S. Bickham, S. Ten, J. Licares, C. Montero, V. Moreno, X. Prieto, V. Tse, K. Chung, A.P.T. Lau, H. Tam, C. Lu, Y. Luo, G. Peng, G. Li, T. Wang // *Optic Express*. – 2012. – Vol. 20(3). – P. 2668-2680.
2. Котляр, В.В. Бесконтактное прецизионное измерение линейных смещений с использованием ДОЭ, формирующих моды Бесселя / В.В. Котляр, Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2001. – № 21. – С. 102-104.

3. Скиданов, Р.В. Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 14-21.

4. Abramochkin, E.G. Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, A. Mayorova, M. Rakhmatulin and V. Volostnikov // Laser Phys. – 2006. – Vol. 16. – P. 842-848.

5. Khonina, S.N. Generation of rotating gauss-laguerre modes with binary-phase diffractive optics // S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // Journal of Modern Optics. – 1999. – Vol. 46(2). – P. 227-238.

6. Kotlyar, V.V. Elliptic laguerre-gaussian beams / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.A. Almazov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. – 2006. – Vol. 23(1). – P. 43-56.

7. Abramochkin, E.G. Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, A. Mayorova, M. Rakhmatulin and V. Volostnikov // Laser Phys. – 2006. – Vol. 16. – P. 842-848.

8. Abramochkin, E.G. Spiral light beams / E.G. Abramochkin and V.G. Volostnikov // Phys. Usp. – 2004. – Vol. 47. – P. 1177.

THE DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR THE CONTROLLED ROTATION OF THE MICRO-OBJECTS

Skidanov R.V., Ganchevskaya S.V.

*(Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University)*

Suggested the method of controlled micro-object's rotation in the non-annular vortex light fields generated by a vortex axicons. Light beams were described based on the whirl's light beams having different topological charges. These experiments results are proving the controlled rotation of the microparticles in a group of those kind of beams. It shows the fact that it's possible to have multi-directional microparticles group rotation varied on the focus, if vortex beams with the different topological charges are present in the superposition.

ИЗОБРАЖАЮЩИЙ СПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНЗЫ

Скиданов Р.В., Бланк В.А.

(Институт систем обработки изображений РАН;
Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)
(СГАУ))

Введение

В последнее десятилетие в прикладной спектроскопии интенсивно развиваются новые методы, позволяющие получать и анализировать спектроскопическую информацию об объекте с пространственным разрешением, обеспечивающие получение для каждой малой области (точки) двумерного изображения объекта на входной апертуре прибора оптического спектра. Такие методы в научной литературе называются изображающей спектроскопией [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. Однако существует дифракционный оптический элемент, который может объединить эти две функции. Довольно давно предпринимаются попытки использования дифракционной линзы для различных приложений [2-5]. Дифракционная линза строит изображения для разных длин волн на разных расстояниях. Однако этот недостаток дифракционной линзы является скорее достоинством, если использовать дифракционную линзу в качестве основы для спектрометра [6]. В данной статье исследуются погрешности построения спектрального изображения белого светодиода при помощи дифракционной линзы. Также строится спектральное изображение для структуры из нескольких светодиодов, с разными спектральными свойствами.

Эксперимент

Для проверки возможности восстановления спектрального распределения для каждой точки изображения, для объектов с широким спектром, был проведён эксперимент, в котором строилась серия изображений белого светодиода с помощью дифракционной линзы с фокусным расстоянием 50мм для длины волны равной 500 нм. Для эксперимента использовалась четырёхуровневая дифракционная линза, описанная в [4]. Диаметр линзы составлял 8мм.

На рис. 1 представлена оптическая схема эксперимента.

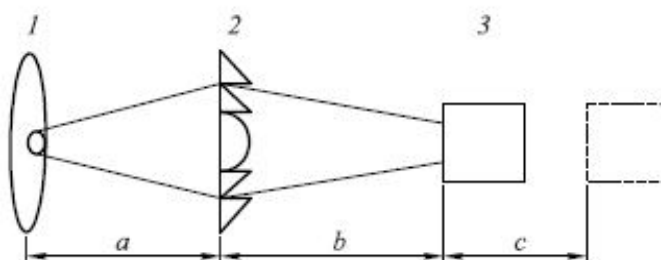


Рис. 1. Схема установки

При этом расстояние от светодиода 1 до дифракционной линзы 2 $a = 2000$ мм было намного больше, чем расстояние от дифракционной линзы до ПЗС камеры 3 (ВИДЕОСКАН-2-205) с разрешением 1390×1040 . В эксперименте камера перемещалась на расстояниях от 40 мм до 60 мм с шагом 0,5 мм, т.е. $c = 20$ мм. Каждому изображению соответствует своя длина волны. Диод располагался для удобства юстировки близко к оптической оси.

Однако напрямую без предварительной обработки использовать экспериментальные изображения нельзя. Дело в том, что из-за изменения расстояния от линзы до изображения меняется его масштаб. Т.е. изображение светодиода смещается относительно центра раstra изображения и дополнительно к этому меняет свой размер. Этого не избежать, даже если расположить изображение светодиода точно в центре. Для преодоления этого эффекта экспериментальные изображения подвергались геометрической трансформации растяжения/сжатия относительно центра раstra изображения с коэффициентом равным отношению расстояний.

После получения последовательности распределений интенсивности на разных расстояниях $I_j(x, y)$ необходимо решить систему линейных уравнений.

$$I_j(x, y) = \sum_{i=1}^N I(x, y, \lambda_i) \frac{A}{A + (b_j - b_i)^2 k_i^{-2} \pi / 4}, j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $I(x, y, \lambda_i)$ элементы спектрального изображения, b_i, b_j – расстояния соответствующие длинам волн, k_i – диафрагменное число дифракционной линзы, $I_j(x, y)$ – распределения интенсивности снятые на расстояниях b_j , A – площадь пиксела в ПЗС матрице. Диафрагменное число для дифракционной линзы определяется по формуле $k_i = d/b_i$, где d – диаметр линзы. Формула (1) была выведена из геометрических соображений. Для изображающего спектрометра эта система уравнений усложняется, поскольку надо учесть вклад в рассеянную компоненту соседних точек на объекте

$$I_j(x, y) = \sum_{i=1}^N \int_{u^2+v^2 < R^2} \frac{I(x+u, y+v, \lambda_i) A}{A + (b_j - b_i)^2 k_i^{-2} \pi / 4} dudv, j = \overline{1, N},$$

где $R = (b_j - b_i) k_i^{-1}$ – размер пятна размытия точки при смещении из фокуса, при $j = i$, в расчетах будем считать, что пятно рассеяния по площади совпадает с площадью пиксела.

Также была учтена спектральная чувствительность ПЗС матрицы. В результате решение системы уравнений (2) для изображений диода, для одной из его точек было получено следующее спектральное распределение (рис. 2, а).

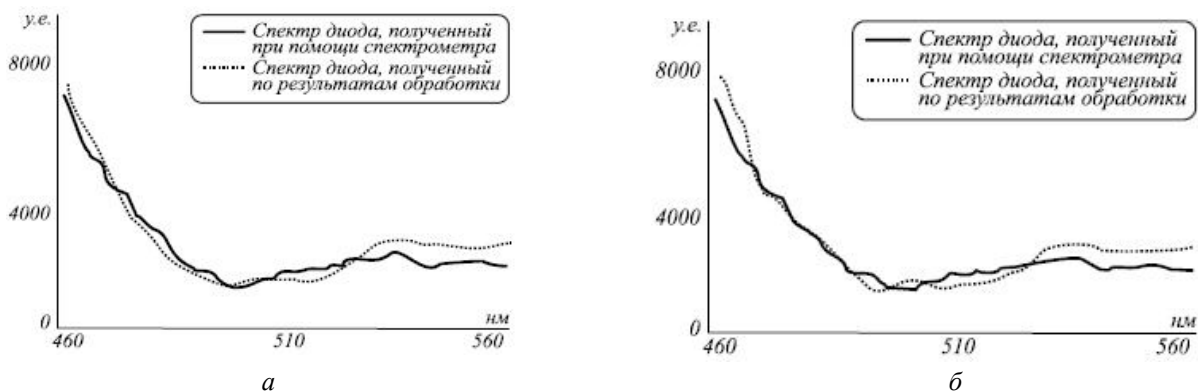


Рис. 2. Спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по: а – формуле (2); б – упрощенному методу

Как видно из рис. 2, *б* наблюдается некоторое ухудшение (по сравнению с рис. 2, *а*) соответствия спектра, полученного на спектрометре (тёмная линия) и спектра полученного после обработки последовательности изображений, сформированных дифракционной линзой. СКО в этом случае составило 13 %. Что на 2 % больше чем СКО точного решения. Однако время обработки при этом снижается более чем на порядок и в некоторых случаях для получения спектральных изображений компактных объектов можно использовать упрощенный алгоритм. Рассмотрим также спектральное изображение структуры из зеленых, красных и белого светодиодов в форме креста, в центре располагается белый диод, по вертикали зеленые диоды, по горизонтали красные диоды (рис. 3). Спектры таких диодов довольно сильно отличаются друг от друга, и, получая спектральное изображение такого объекта, мы тем самым подтверждаем, что спектрометр на основе дифракционной линзы действительно является изображающим.

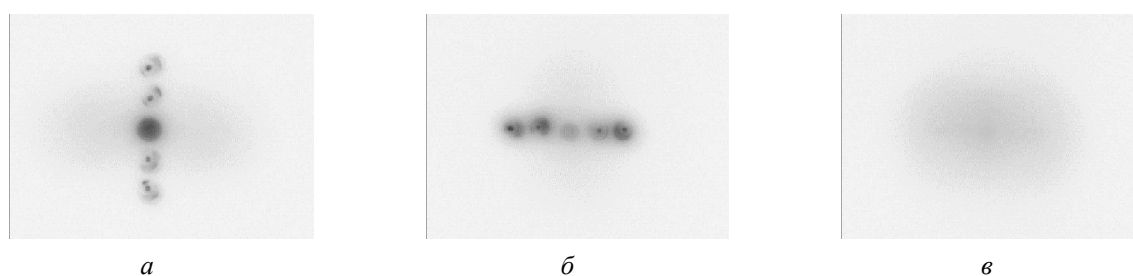


Рис. 3. Изображение структуры из зеленых, красных и белого диода (в центре): *а* – положение матрицы, при котором видны зеленые диоды; *б* – положение матрицы, при котором видны красные диоды; *в* – положение матрицы, при котором еще не видны светодиоды

На рис. 4 представлены спектры, полученные для зеленого и красного диодов в сравнении с их же спектрами, измеренными на MS7501.

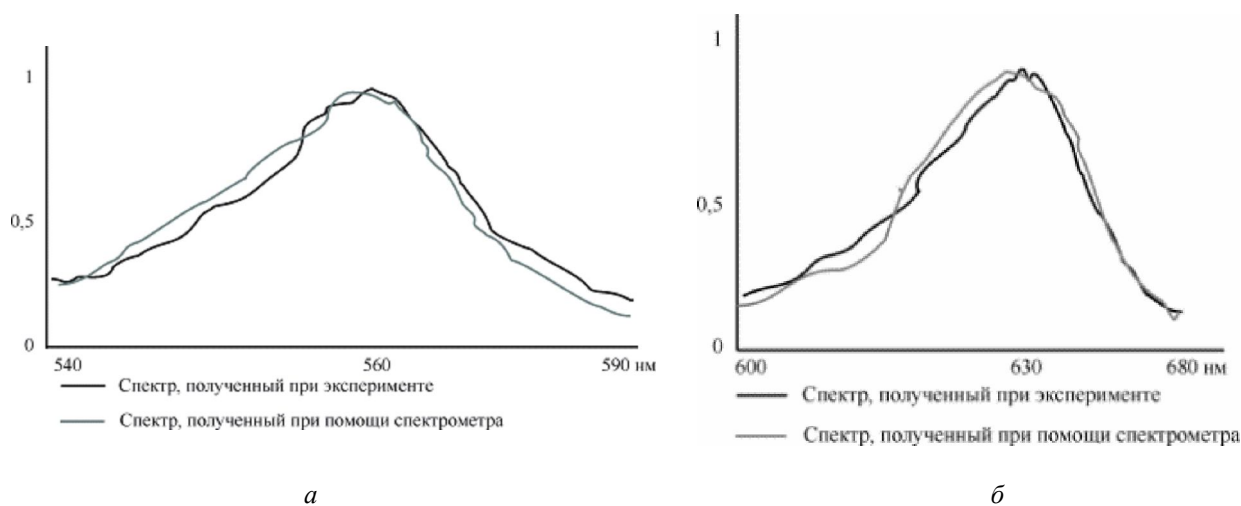


Рис. 4. Спектр зеленого диода, полученный в эксперименте в сравнении с его же спектром, измеренных на MS7501 (*а*), спектр красного диода, полученный в эксперименте в сравнении с его же спектром, измеренных на MS7501 (*б*)

Значение СКО на рис. 4, *а* – 8 %, на рис. 4, *б* – 11%. При работе с более сложными изображениями в будущем стоит использовать точный метод на основе системы (2). Исходя из полученных результатов, можно говорить о работоспособности этого простейшего изображающего спектрометра, состоящего всего из одной дифракционной линзы.

Заключение

Исследована погрешность работы простейшего изображающего спектрометра, в котором изображающая система и дисперсионный элемент составляют единое целое - спектрометр на основе дифракционной линзы.

Результаты проведенных экспериментов, позволяют говорить погрешности формирования спектральных изображений с помощью дифракционной линзы с погрешностью 8-13 %, что примерно соответствует погрешности существующих образцов гиперспектральных камер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-31-00014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воропай, Е.С.* Дисперсионный гиперспектрометр с реконфигурируемой входной апертурой на основе микрзеркальной матрицы / Е.С. Воропай, И.М. Гулис, А.Г. Купреев, др. // Вестник БГУ. – 2009. – Сер.1, №3. – С. 31-35. – ISSN 0321-0367.

2. *Хонина, С.Н.* Бинарная линза: исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, №3. – С. 339-346. – ISSN 0134-2452.

3. *Buralli, D.A.* Design of diffractive singlets for monochromatic imaging/ D.A. Buralli, G.M. Morris// Applied optics. – 1991. –Vol. 30(16). – P. 2151-2158. – ISSN 1559-128X.

4. *Казанский, Н.Л.* Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой/ Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский.// Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 38, № 3. – С. 325-345. – ISSN 0134-2452.

5. *Motogaito, A.* Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution/ A. Motogaito, Kazumasa Hiramatsu // Optical and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 67-73. – ISSN 2160-8881.

6. *Kitaura, N.* Spectrometer employing a micro-Fresnel lens / N. Kitaura, S. Ogata, Y. Mori // Optical Engineering. –1995. – Vol. 34. – P. 584-588.

IMAGING SPECTROMETER BASED ON DIFFRACTION LENS

Skidanov R.V., Blank V.A.

*(Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University)*

Abstract

The possibility of using diffractive lens in simple hyperspectrometer. Experimentally formed of hyperspectral images for white, red and green LEDs. The experimental image was subjected to the geometric transformation of the stretching/compression. We investigate the error of the work of the simplest of imaging spectrometer.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ МНОГОКРАТНОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

Черных В.Т.¹, Черных Г.С.²

¹ Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ);

² ЦКБ «Фотон», г. Казань)

Исследование слабых оптических неоднородностей относится к области измерений малых значений показателя преломления или разности хода световых лучей, как правило, не превышающих величину одной десятой длины световой волны. Традиционный метод двухлучевой интерферометрии по чувствительности удовлетворяет этим требованиям. Однако при разности хода меньше указанной величины необходимо применять более чувствительные методы интерференционных измерений. В частности, работа [1] посвящена разработке методов повышения чувствительности оптических измерений на основе многократного прохождения светового пучка сквозь исследуемую неоднородность. Однако, реализация этого метода требует использования высококачественных элементов оптической системы и связана со сложной техникой оптического эксперимента. В [2-6] приведены результаты широкого поиска новых методов повышения чувствительности интерференционного метода измерений. В основу методов положены достижения в области когерентной оптики- голографической интерферометрии. Авторами аналитически рассмотрены различные методы повышения чувствительности и выполнены их экспериментальная апробация как в лабораторных условиях, так и в газодинамических экспериментах. Среди этих методов следует отметить: использование метода двух объектных голограмм, метод трех когерентных пучков и метод на основе использования двух длин волн. Результаты испытаний методов показали их практическую применимость, а так же отмечены их недостатки. Главным недостатком методов является то, что при их реализации не всегда удается исключить дефекты оптической системы, а также ее аберрации. Поэтому поиск новых путей повышения чувствительности интерференционных измерений является практически важной задачей и в настоящее время в области оптических интерференционных измерений.

Одним из таких путей решения поставленной задачи, является поиск эффективного сочетания методов многократного просвечивания прозрачной оптической неоднородности и метода голографической интерферометрии на основе двухкратного экспонирования голограммы. Первое позволяет увеличить величину разности фаз, пропорционально числу проходов объектного пучка сквозь неоднородность, а второе – практически полностью исключить влияние дефектов оптической системы на качество полос голографической интерферограммы повышенной чувствительности.

Далее, обсуждается способ повышения чувствительности метода голографической интерферометрии на основе многократной дифракции обращенных объектных световых пучков [7]. Суть способа состоит в том, что пучок нулевого порядка образующийся при прохождении через решетку 1, выбирается в качестве исходного объектного пучка $W_{об}$, как показано на рис. 1.

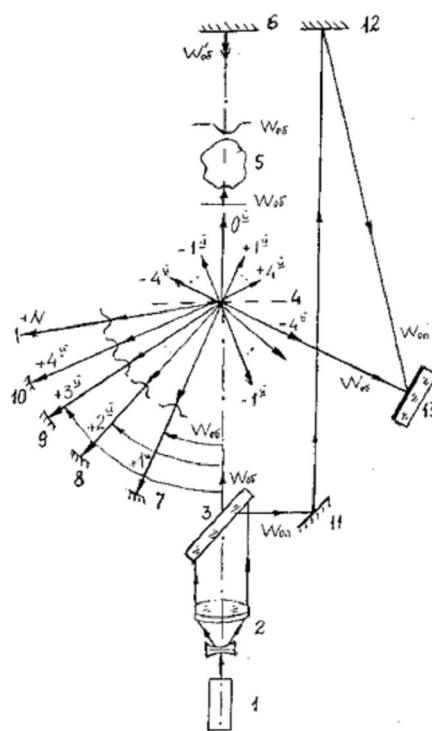


Рис. 1

Объектный пучок проходит через слабую оптическую неоднородность 2 в прямом $W_{об}$ и обратном $W_{об}'$ направлениях. Пучок $W_{об}'$ возвращается в плоскость решетки по нормали к ее поверхности, при этом достигается двухкратное увеличение набега фазы $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(2 \cdot \Delta l)$, где Δl – разность оптических путей между лучом, прошедшим через объект 2, и лучом, идущим вне объекта исследования.

Объектный пучок $W_{об}'$, дифрагируя в обратном ходе на решетке 1, формирует набор дифрагированных объектных пучков: пучок нулевого порядка $W_{об}'$, $W_{об+1}'$, $W_{об+2}'$, $W_{об+3}'$ и т.д. Для удобства рассмотрения на рисунке указаны только объектные пучки, распространяющиеся в направлениях положительных углов дифракции ($W_{об}'$, $W_{об+1}'$, $W_{об+2}'$, $W_{об+3}'$ и т.д.). Далее эти пучки одновременно возвращаются в прямом ходе в плоскость дифракционного элемента. При дифракции на элементе прямошедшие пучки будут выполнять роль нулевых порядков. А пучки, дифрагированные в направлении исходного объектного пучка $W_{об}$, будут вновь просвечивать исследуемые объект в прямом и обратном ходе, и, тем самым, увеличивая фазовый набег объектной волны. За счет этого достигают многократного повышения чувствительности метода голографической интерферометрии.

Метод экспериментально испытан на макете голографического интерферометра, оптическая схема которого приведена выше. Когерентное излучение от лазера 1 поступает в коллиматор 2. Далее пучок направляется на светоделитель 3, посредством которого делится на объектный $W_{об}$ и опорной $W_{оп}$ пучки. Опорный пучок $W_{оп}$ поступает в опорную ветвь, образованную элементами 3, 11, 12 и 13.

Объектный пучок $W_{об}$ далее поступает в прямом ходе на дифракционный элемент 4. Элемент 4 разлагает этот пучок на ряд дифрагированных пучков: нулевой и высшие порядки дифракции. Пучок нулевого порядка, распространяясь в прямом направлении, просвечивает рабочую зону 5 и падает на зеркало 6. Оптические элементы 3-10 образуют объектную ветвь $W_{об}$ голографического интерферометра.

В световых пучках положительных углов дифракции перпендикулярно оптической оси установлены зеркала 7-10 для одновременного возврата пучков W_7 – W_{10} в прямом ходе в плоскость дифракционного элемента 4.

Дифрагированные объектные пучки в обратном ходе распространяются в направлениях как положительных, так и отрицательных порядков. Для регистраций объектного и опорного пучков узел голограммы устанавливают в одном из отрицательных порядков, например, в пучке минус третьего порядка обратного хода лучей. Голограмму регистрировали по методу двух экспозиций.

На рис. 2, а, б приведены интерферограммы неоднородности факела пламени без увеличения чувствительности (а) и с повышенным коэффициентом чувствительности, равным 8 крат. (б). На снимке 2, б полосы прямые, контрастные и высокого разрешения.

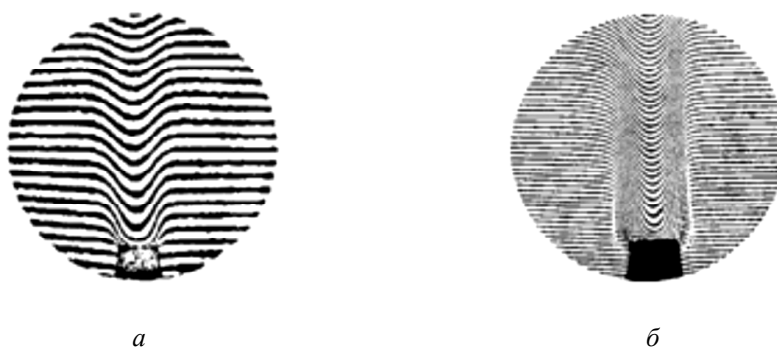


Рис. 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скоков И.В. Оптические интерферометры. – М.: Машиностроение, 1979. – 247 с.
2. Врунгахл О., Лохманн А.В. Opt. Soc. Amer. – Vol. 58, №1. – 1968.
3. Мустафина Л.Т. Авт. свид. №545170, Бюл. 4, 1977 г.
4. Мустафин К.С., Селезнев В.А. Оптика и спектроскопия, 1971. – Т. 30. – С. 154,
5. Мустафин К.С., Селезнев В.А. Оптика и спектроскопия, 1972. – Т. 32. – С. 993.
6. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. – Л.: Наука, 1972. – С. 76-96.
7. Черных В.Т., Черных Г.С., Борисов А.Н. Голографический интерферометр Патент на полезн. мод. №123933 от 10.01.13 г., Бюл. № 1, 2013.
8. Черных В.Т., Зелинский И.Н. Оптика и спектроскопия, 1979. – Т. 46. – С. 795.

**METHOD OF INCREASING THE SENSITIVITY
OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY METHOD BASED
ON MULTIPLE DIFFRACTION OF LIGHT BEAMS**

Chernykh V.T., Chernykh G.S.

*(Kazan State Power Engineering University (KSPEU);
CDB «Photon», Kazan)*

The method of holographic interferometry with high sensitivity measurements of weak optical inhomogeneities. In implementing the method of using a transparent diffraction grating formed bundles of zero and higher diffraction orders. Thus the zeroth order beam is selected as the object beam source. The object beam passes through the inhomogeneity and then return it to the return stroke in a plane normal to the grating surface. This is achieved by a two-fold increase in the initial deformation of the object wavefront. Further, this wave front passing through the grating in the reverse, generates the actual set of diffracted object beam with the same deformation of the wavefront. Then, each of these object beams back into the plane of the lattice. Diffracting on the grid, pryamoproshedshie object beams act as zero-order beams corresponding directions. The diffracted beams with the first orders will go through the inhomogeneity in the direction of the original object beam, receiving each time twice the phase shift. By such repeated treatment diffracted object beam on the diffraction element is achieved by increasing the deformation of the object wavefront - increased sensitivity of interference measurements.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Белозеров А.Ф.¹, Черных В.Т.², Черных Д.А.³

¹ОАО «НПО ГИПО»;

²Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ);

³Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань)

Для визуализации и количественного изучения быстропротекающих процессов разработаны и проанализированы голографические устройства двух видов. Данные устройства могут полезными в баллистических, газодинамических экспериментах по изучению обтекания тел в свободном полете, а также в различных энергоустановках по изучению процессов смешения, воспламенения и горения топлив.

В первом варианте голографического устройства [1] реализован метод фронтального просвечивания исследуемого потока. На рис. 1 изображена принципиальная схема оптической системы голографического устройства. Принцип действия устройства заключается в следующем. Когерентное излучение от лазера 1 посредством светоделителя 2 делится на опорный $W_{оп}$ и объектный $W_{об}$ световые пучки. Эти пучки поступают, соответственно, в коллиматоры 3 и 10 объектной и опорной ветвей. Далее объектный пучок $W_{об}$ отражается от плоскопараллельной пластины 4, просвечивает рабочую зону 11 и, отразившись от второй плоскопараллельной пластины 5, поступает в проекционный объектив 6. Проекционный объектив 6 сопрягает плоскость рабочей зоны 11 с плоскостью регистрирующей среды 7.

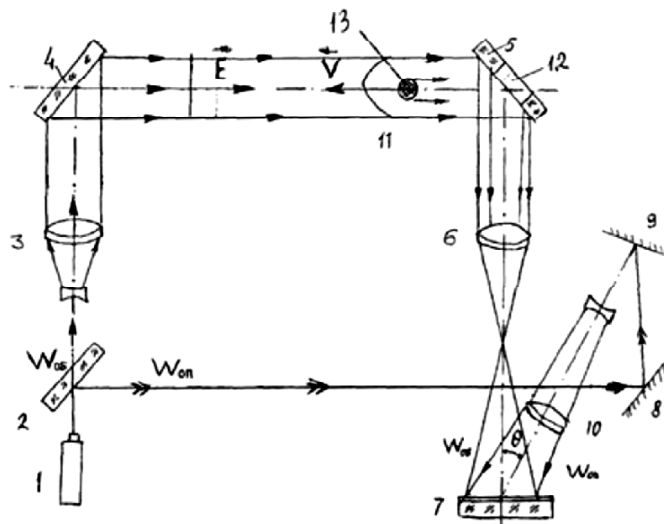


Рис. 1

Опорный пучок $W_{оп}$ с помощью зеркал 8 и 9 вводится в коллиматор 10 опорной ветви. Опорный пучок поступает в плоскость регистрирующей среды 7 под некоторым углом θ к объектному пучку $W_{об}$.

Голограмму регистрируют двухэкспозиционным методом. За время первой экспозиции объект исследования 13 в рабочей зоне 11 отсутствует. При второй экспозиции в рабочую зону 11 сквозь отверстие 12, выполненное в пластине 5, поступает тело 13, движущееся со сверхзвуковой скоростью, газодинамическое течение около которого исследуется.

Как показано на рисунке, в это время в рабочей зоне 11 распространяется объектный пучок $W_{об}$, электрический вектор E которого параллелен вектору скорости V движущегося тела 13, но противоположен по направлению.

При восстановлении волновых фронтов с голограммы получают интерференционную картину, полосы которой имеют концентрическую форму и соответствуют плоскости наблюдения, перпендикулярной оптической оси объектной ветви. Эти полосы соответствуют линиям равной плотности и будут характеризовать радиальное распределение плотности потока около движущегося тела.

Следует отметить, что при исследовании обтекания тел (например, модель сфера), создающих осесимметричные течения, разброс по траектории движения достаточно мал, и диаметр отверстия в пластине 5 может превышать на несколько миллиметров диаметр движущегося тела. При решении других баллистических задач диаметр отверстия в пластине 5 должен выбираться с учетом разброса траектории движения модели.

На макете голографического устройства получена интерферограмма неоднородностей факела пламени около фитиля, имеющего шарообразную форму. Объектная ветвь устройства была ориентирована в вертикальной плоскости. Пучок $W_{об}$ просвечивал факел пламени сверху вниз. Интерференционные полосы на интерферограмме представляют собой концентрические кольца, а в центре картины вместо шарообразного фитиля – темное пятно.

Разработано также голографическое устройство [2] для решения более сложных практических задач, возникающих при изучении быстропротекающих газодинамических течений. Посредством этого устройства можно количественно изучать обтекание движущегося тела в двухфазном потоке твердые частицы – газ, а также получать сведения о параметрах частиц в потоке в запреградной зоне, образующейся при взаимодействии движущегося тела с преградой. Наряду с этим посредством голографического устройства можно одновременно получать сведения о состоянии поверхности тел, движущихся при сверхзвуковых скоростях.

Принципиальная схема оптической системы голографического устройства изображена на рис. 2. Отличительной особенностью этой системы является то, что она обеспечивает за время одного эксперимента одновременно записывать две голограммы. Первая голограмма регистрируется в проходящем объектном пучке сквозь исследуемый поток. Эта голограмма записывается в плоскости 9 при наложении прямошедшего объектного $W_{об}$ и опорного $W_{оп}$ пучков. За время этой же экспозиции в устройстве осуществляется регистрация второй голограммы в плоскости 17. При записи этой голограммы объектный пучок $W_{об}'$ формируется за счет светового потока рассеянного на поверхности тела или ансамбля частиц, присутствующего в потоке. Объектный пучок $W_{об}'$ интерферирует с опорным пучком $W_{оп}'$ в плоскости регистрирующей среды 17.

Для получения четких границ тела 6 и частиц, движущихся в двухфазном потоке, в объектных ветвях используют проекционные

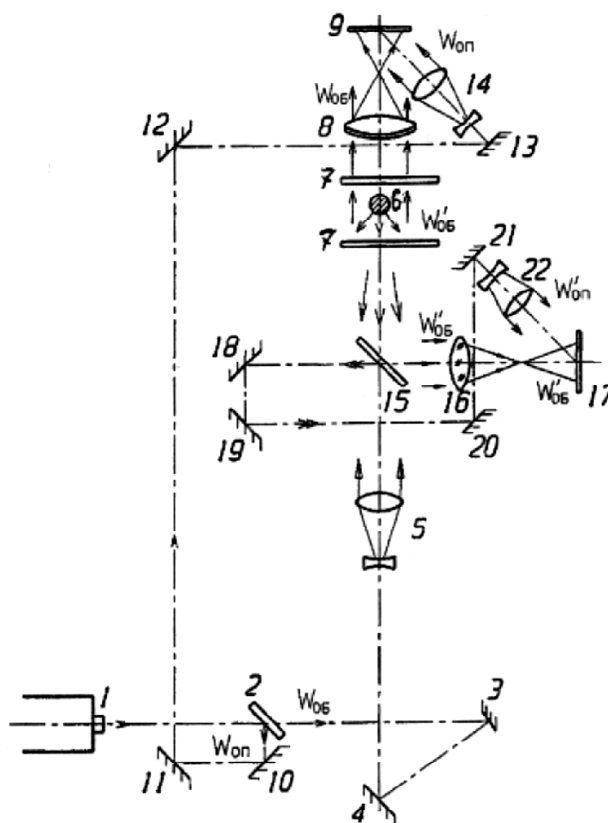


Рис. 2

оптические системы 8 и 16, позволяющие записывать голограммы сфокусированного изображения объекта.

В голографическом устройстве голограмму 9 регистрируют двухэкспозиционным методом. При восстановлении волновых фронтов получают голографическую интерферограмму, которую в дальнейшем используют для количественных измерений поля плотностей. Голограмму 17 можно регистрировать как одно – так и двухэкспозиционными методами. При записи голограммы 17 посредством одноэкспозиционного метода в рабочей зоне 7 должен присутствовать исследуемый объект. После этого световые пучки $W_{об}'$ и $W_{он}'$ экранируются и производится вторая экспозиция при записи голограммы 9. Одновременная запись двух голограмм позволяет повысить идентификацию частиц в потоке на стадии обработки голографических изображений ансамбля частиц. Регистрация голограммы с рассеянным объектным пучком может позволить более эффективно изучать такие явления как эрозия массы поверхности тела, движущегося при сверх – и гиперзвуковых скоростях. Испытания голографических устройств на реальных газодинамических объектах выявлять их практические возможности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных В.Т., Черных Г.С. Способ голографической визуализации обтекания движущегося тела, Патент на изобр. № 2502950 от 31.07.2012 г., Бюл. № 36, 2013.
2. Черных В.Т., Черных Г.С. Голографическое устройство для изучения быстропротекающих процессов. Патент на полезн. мод. № 140573 от 27.12.13 г., Бюл. № 13, 2013.

HOLOGRAPHIC DEVICES FOR THE STUDY OF FAST PROCESSES IN POWER PLANTS

Belozarov A.F.¹, Chernykh V.T.², Chernykh D.A.³

(¹JSC «NPO GIPO»;

²Kazan State Power Engineering University (KSPEU);

³Kazan National Research Technical University A.N. Tupolev-KAI, Kazan)

Reviewed the development of holographic devices of two types быстропротекающих applied to the study of processes taking place in a gas-dynamic ballistic experiments in power plants to study the processes of mixing and burning fuel ignition.

In the first embodiment the holographic device is arranged so that unlike the prior art devices it branches to the electric vector of the object of the of the object light beam is oriented parallel to the velocity vector of the moving body i.e. it carried a front-raying the test flow. Represented by the holographic device is designed for the first time in the practice of gas-dynamic studies.

Also have another type of holographic device allowing for one experiment to record two holograms in transmitted and reflected light from the object. Registration in the reflected light of the holograms allows to control the surface state of an object moving at high speeds of with the body motion in a two – phase flow of solids – gas. The brief description of the principle of construction schemes of optical systems developed holographic devices.

СЕКЦИЯ 5

**ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ,
ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ,
ОПТИКО-ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

SECTION 5

**HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY,
HOLOGRAPHIC MEMORY, HOLOGRAPHIC
OPTICAL-INFORMATION PROCESSING**

ИНВАРИАНТНЫЕ ФИЛЬТРЫ С МИНИМУМОМ ШУМА И ЭНЕРГИИ КОРРЕЛЯЦИИ: ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

*Шаульский Д.В., Стариков Р.С., Злоказов Е.Ю., Евтихийев Н.Н.,
Петрова Е.К., Молодцов Д.Ю.*

(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

Введение

Использование инвариантных корреляционных фильтров (КФ) позволяет эффективно решать задачу распознавания объектов в условиях различного рода искажений входного изображения, таких как шум, помехи, искажения геометрии и изменение условий освещенности анализируемого объекта. Инвариантность распознавания достигается за счет учета информации об ожидаемых дефектах входного сигнала при синтезе фильтра. Одним из базовых методов создания КФ является синтез составных КФ [1, 2]. Такие КФ могут обеспечить высокое качество распознавания, благодаря возможности контроля характеристик корреляционного пика. Особый практический интерес имеет задача применения КФ в оптических системах распознавания, таких как 4-F коррелятор благодаря возможности достижения высокой скорости расчета кросскорреляционной функции. В наших предыдущих работах было показано, что это может быть реализовано путем применения цифровых методов синтеза голографических фильтров [4, 5]. Другой способ реализации КФ в условиях ограниченного диапазона модуляции, который соответствует реальной характеристика пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) является поиск оптимальных проекции фильтра на характеристики ПВМС [6, 7]. Данная работа посвящена вопросу расчета КФ в виде оптимальной проекции фильтра и сравнению двух методов реализации.

Постановка задачи

Ограниченный диапазон модуляции является недостатком современных пространственных модуляторов света с быстрым временем переключения и высокой дифракционной эффективностью. Например, такие ПВМС могут обеспечивать только двоичные амплитудную или фазовую модуляции. Характеристики самых популярных ПВМС представлены на диаграммах комплексного единичного круга (рис. 1).

Для нашего анализа был выбран МШЭК фильтр [8]. Априори известным типом искажения, учитываемым при синтезе фильтра был разворот на 180° с ракурсом обзора в 50° от горизонтали, всего 180 изображений. В состав фильтра входили 90 изображений эталонного объекта – модели танка Leclerc. Остальные модели танков рассматривались в качестве ложных объектов (рис. 2).

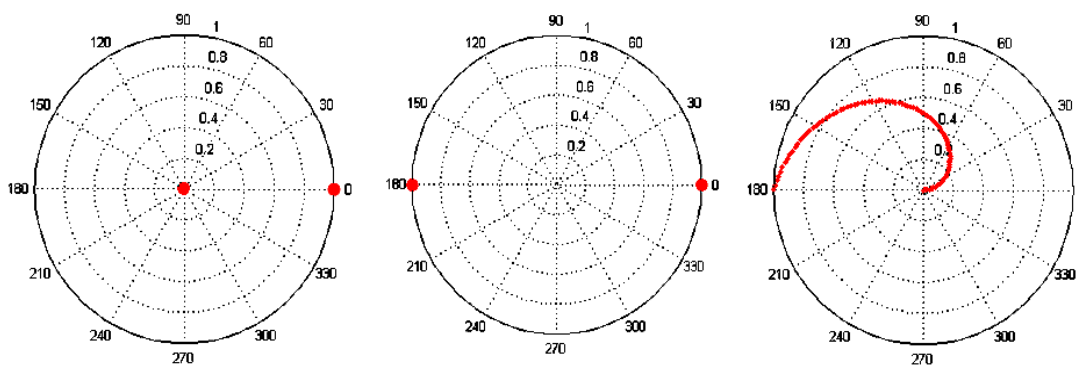


Рис. 1. Двоичная амплитудная, фазовая и спиральная характеристики ПВМС



Рис. 2. Исследуемые объекты – модели танков Abrams Chieftain Leclerc Leopard2 T72 Type90

Голографический фильтр

Как уже было упомянуто, в оптической схеме 4-F коррелятора КФ могут быть представлены синтезированным дифракционными объектами – Фурье-голограммами (далее голографический фильтр, ГФ). Для анализа данного метода был рассчитан голографический фильтр имеющий 256 градаций серого и увеличенное по сравнению с исходным КФ количество отсчетов в 4 раза. Затем были использованы два способа перевода ГФ к бинарному виду: метод Отсу и метод стохастического растривания. В методе стохастического растривания были рассмотрены два случая – представление одного полутонового отсчета пятью и симнадцатью бинарными отсчетами. Вид центральных частей полученных ГФ представлены на рис. 3.



Рис. 3. Полутоновая голограмма, метод Отсу, стохастическое растривание 5 отсчетов, стохастическое растривание 17 отсчетов

В результате компьютерного моделирования решения задачи распознавания с использованием 180 изображений объектов эталонного и ложного классов и голографического филь-

ра в различных представлениях была получена зависимость высоты корреляционных пиков от угла поворота объектов представленная на рис. 4, 5.

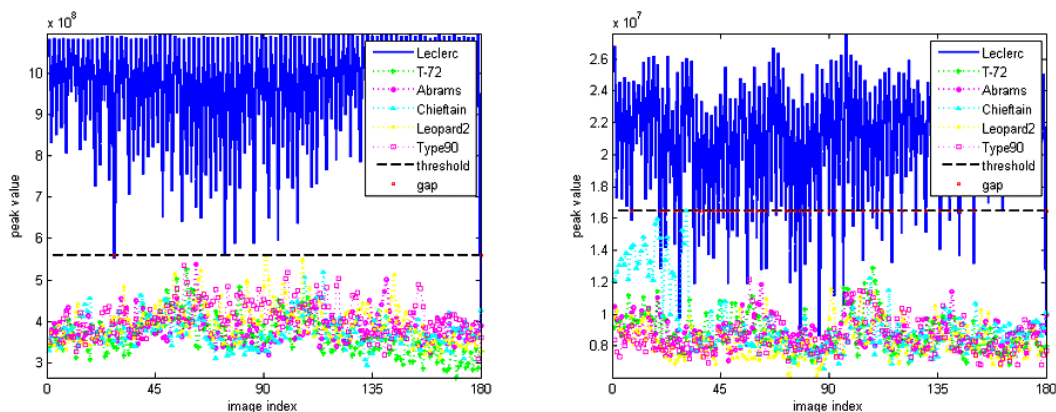


Рис. 4. Полутоновая голограмма и метод Отсу

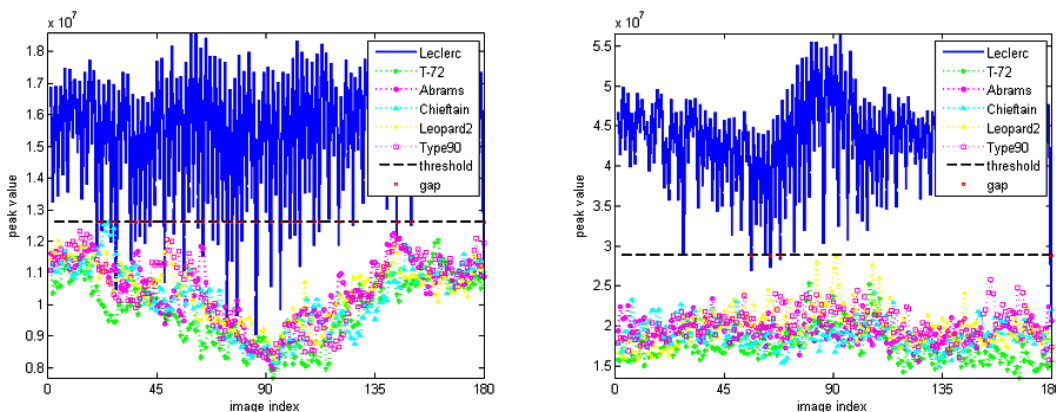


Рис. 5. Стохастическое растрирование до 5 и 17 уровней

Соответствующая оценка ошибки распознавания составила полутоновая голограмма – 0,0131, метод Отсу – 0,0946, стохастическое растрирование до 5 уровней – 0,1673, стохастическое растрирование до 17 уровней – 0,0174.

Результаты моделирования показали, что ГФ представленный в бинарном виде с помощью метода стохастического растрирования до уровня семнадцати отсчетов дал меньшее значение оценки ошибки распознавания, однако стоит учитывать, что размер фильтрующего элемента увеличивается в таком случае в 256 раз (в 16 раз увеличивается сторона).

Оптимальная проекция фильтра

Помимо использования метода синтеза ГФ для реализации КФ в условиях ограниченности диапазона модуляции света, возможно применение методов адаптирующих КФ к характеристикам ПВМС. Изначально рассчитанный фильтр представляет собой матрицу комплексных чисел, значения которой можно изобразить на диаграмме единичного комплексного круга, так же как и ранее были изображены характеристики различных ПВМС (рис. 6).

Использование комплексного круга дает возможность наглядно охарактеризовать область доступных для модуляции света значений амплитуды и фазы ПВМС. Идея адаптации фильтра к характеристике модулятора заключается в поиске так называемой оптимальной проекции фильтра (фурье-образа фильтра) на значения доступные для модуляции ПВМС. При этом в

качестве критерия оптимальности могут выступать как минимальная евклидова дистанция фильтра от его проекции, так и оценка ошибки распознавания. Параметрами оптимизации выступают общий для всех значений фильтра фазовый и амплитудный множители, осуществляющие соответственно поворот или масштабирование положения значений фурье-образа фильтра в комплексном круге.

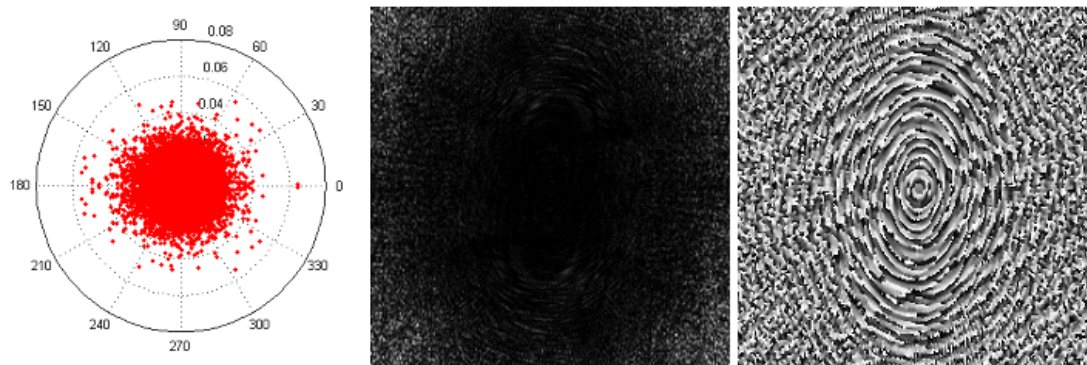


Рис. 6. Значения фильтра, амплитуда и фаза фильтра

В результате поиска оптимальной проекции синтезированного фильтра для двоичного фазового ПВМС была получена зависимость евклидовой дистанции от амплитудного и фазового множителей фильтра.

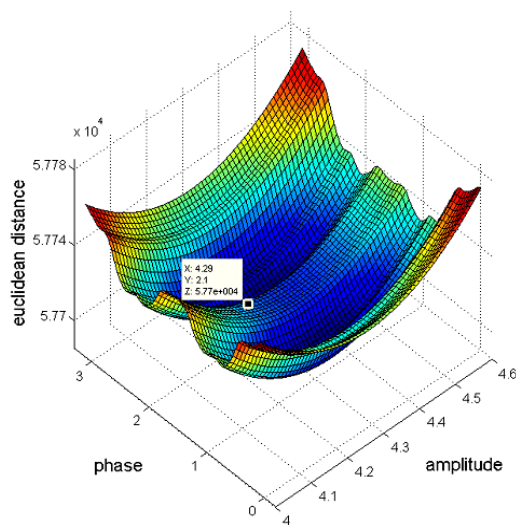


Рис. 7

В случае несимметричной относительно центра комплексного круга характеристики ПВМС, таких как для двоичного амплитудного модулятора и модулятора с сопряженными фазой и амплитудой, использование евклидовой дистанции в качестве критерия выбора амплитудного и фазового множителей не возможно, так как евклидова дистанция стремится к нулю с уменьшением амплитудного множителя и не имеет локального минимума. В таком случае актуально использование оценки ошибки распознавания в качестве критерия и одного из методов оптимизации (к прим. градиентного спуска) для ускорения процесса выбора поиска локального минимума.

В результате компьютерного моделирования решения задачи распознавания с использованием 180 изображений объектов эталонного и ложного классов и оптимальной проекции

фильтра для различных характеристик ПВМС была получена зависимость высоты корреляционных пиков от угла поворота объектов представленная.

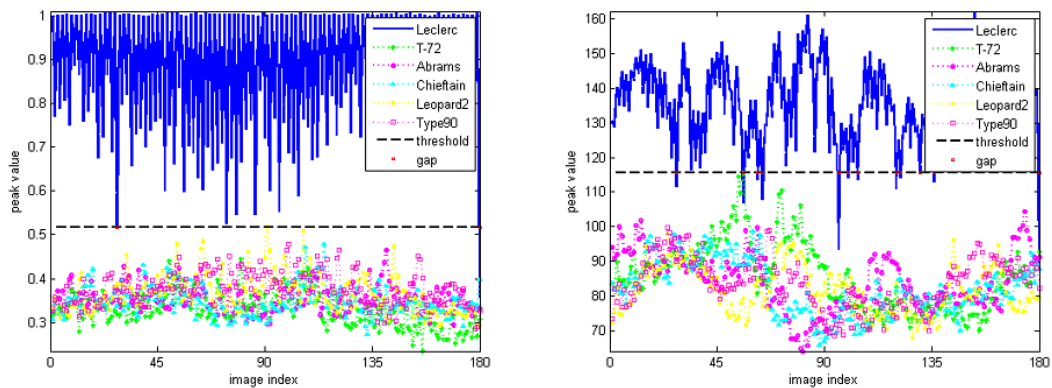


Рис. 8. Исходный фильтр и проекция на двоичную амплитудную характеристику

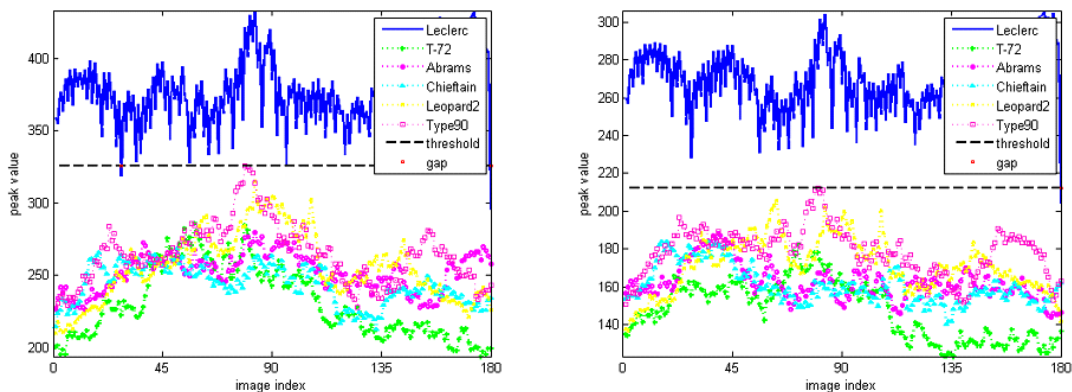


Рис. 9. Проекция на двоичную фазовую и спиральную характеристику

Соответствующая оценка ошибки распознавания составила полутоновая исходный фильтр – 0,011, проекция на двоичную амплитудную характеристику – 0,0259, проекция на двоичную фазовую характеристику – 0,0164, проекция на спиральную характеристику – 0,0063.

Таким образом, проекция фильтра дала значение оценки ошибки распознавание меньше чем исходный фильтр. Данный результат объясняется использованием самой оценки ошибки распознавания в качестве критерия поиска амплитудных и фазовых множителей, тем самым осуществляется дополнительная оптимизация фильтра, также ведущая и к его адаптации к характеристикам ПВМС.

Заключение

В данной работе была продемонстрирована возможность реализации составного корреляционного фильтра в системе 4-F коррелятора в виде голографического фильтра и оптимальной проекции фильтра в условиях ограниченного диапазона модуляции света. Результаты показали, что для реализации фильтра на двоичном амплитудном пространственно-временном модуляторе света, возможно использование метода стохастического растривания исходного голографического фильтра до семнадцати уровней. Также получены результаты демонстрирующие снижение оценки ошибки распознавания при использовании ее в качестве целевой функции при поиске оптимальной проекции фильтра на спиральную характеристику пространственно-временного модулятора света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kumar B.V.* [Correlation pattern recognition], Cambridge University Press (2005).
2. *Vijaya Kumar B.V.K.* Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study. *Opt. Eng* 47, 067202 (Jun 2008).
3. *Lugt B.A.V.* Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Transactions on Information Theory* 10(2), 139{145 (1964).
4. *Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Starikov R.S., and Zlokazov E.Y.* Minace filter realization as computer generated hologram for 4-f correlator. *Proceedings of SPIE* 8748 (2013).
5. *Shaulskiy D.V., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., and Zlokazov E.Y.* Minace filter: variants of realization in 4-f correlator. In [Optical Pattern Recognition XXV], 9094, 90940K (2014).
6. *Laude V. and Refregier P.* Multicriteria characterization of coding domains with optimal fourier spatial light modulator filters. *Appl Opt* 33, 4465{4471 (Jul 1994).
7. *Hanying Zhou T.-H.C.* Mach filter synthesizing for detecting targets in cluttered environment for grayscale optical correlator. In [Proc. SPIE 3715, Optical Pattern Recognition], (1999).
8. *Ravichandran G. and Casasent D.* Minimum noise and correlation energy optical correlation filter. *Applied Optics* 30(35), 5176{5181 (1992).

MINIMUM NOISE AND AVERAGE CORRELATION ENERGY FILTERS: REALISATION POSSIBILITIES USING AVAILABLE SPATIAL LIGHT MODULATORS

*Shaulskiy D.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu., Evtikhiev N.N.,
Petrova E.K., Molodtsov D.Yu.*

The present article is dedicated to the possibilities of realization of minimum noise and average correlation energy filters (MINACE) in optical 4-F correlator of images. Two methods of realisation are discussed and compared: realisation as computer-generated Fourier hologram and realisation using optimal projection method.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОДНОМЕРНЫХ МИКРОГОЛОГРАММ ФУРЬЕ ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПАМЯТИ

*Донченко С.С., Бетин А.Ю., Бобринёв В.И., Одинокоев С.Б.,
Злоказов Е.Ю., Стариков Р.С.*

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

Применение методов компьютерной голографии при создании систем оптико-голографической памяти позволяет значительно снизить стоимость устройства записи микроголограмм на голографический диск. В наших предыдущих работах был представлен метод записи микроголограмм, основанный на проецировании компьютерно-синтезированных амплитудных голограмм Фурье с многократным уменьшением на поверхность голографического носителя. Так же, для реализации возможности мультиплексной записи, была предложена идея о применении одномерных голограмм. Представленный в работе материал является продолжением исследования компьютерно-синтезированных 1D-Фурье голограмм для системы голографической памяти, в частности рассмотрены две схемы считывания данных с одномерных микроголограмм, обсуждены преимущества и недостатки представленных схем.

Интерес к системам голографической памяти обусловлен принципиальной возможностью хранения больших объёмов информации с высокой плотностью записи, высокой скоростью доступа к запрашиваемой информации и долгосрочностью архивного хранения. Одной из существенных проблем большинства исследуемых систем голографической памяти является сложность и высокая стоимость устройства записи. Как известно, аналоговый метод записи голограмм основан на фиксации интерференционной картины между когерентными опорным и пространственно промодулированным предметным лучами. Качество записанной голограммы в значительной степени зависит от точности оптической схемы устройства записи, наличия внешних помех и стабильности работы используемого источника излучения – лазера. Перечисленные факторы играют важную роль в формировании стоимости записывающего устройства. При компьютерном синтезе голограмм интерференционная картина рассчитывается численно, синтезированная голограмма может быть выведена на экран амплитудного пространственно-временного модулятора света и спроецирована на голографический носитель с использованием как когерентного источника света – лазера, так и обычного свето-диода или самосветящегося OLED-дисплея. Записывающее устройство при этом обладает пониженными требованиями к прецизионности оптической схемы по сравнению с чисто аналоговым методом, что значительно снижает стоимость такого устройства.

Для достижения высокой плотности записи информации, известные системы голографической памяти используют возможность мультиплексирования голограмм, обладающих селективностью к тем или иным характеристикам считывающего пучка, например угол падения или фазовый портрет его волнового фронта. Исследования показали, что при считывании мультиплексированных классических двумерных компьютерно-синтезированных Фурье-голограмм, записанные объекты восстанавливаются одновременно со всех голограмм перекрывая друг друга, что делает невозможным их автоматическое считывание. Для решения этой проблемы нами было предложено применение одномерных Фурье-голограмм (1D-Фурье голограммы), обладающих высокой чувствительностью к углу ориентации цилиндрической линзы, используемой в оптической схеме считывания. При считывании мультиплексированных голограмм с разной ориентацией цилиндрической линзы, голограмма с выбранной ориентацией восстанавливается с высокой яркостью и точностью записанного объекта, в то время как объекты с других голограмм оказываются расфокусированными и обладают пониженной яркостью.

На рис. 1-2 представлены две схемы считывания информации с 1D-Фурье голограмм: по-страничная и по-строчная схемы соответственно.

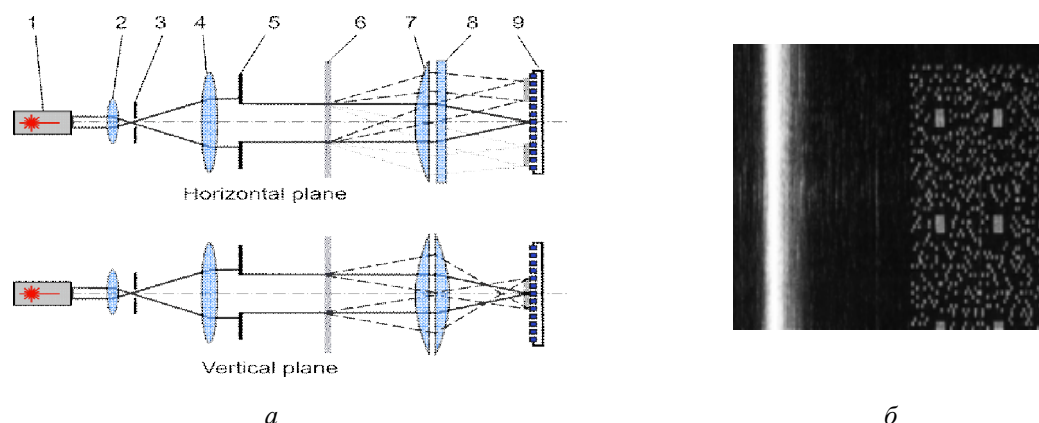


Рис. 1. Схема по-страничного считывания компьютерно-синтезированных 1D-Фурье голограмм (а); элемент восстановленного с голограммы светового поля (б)

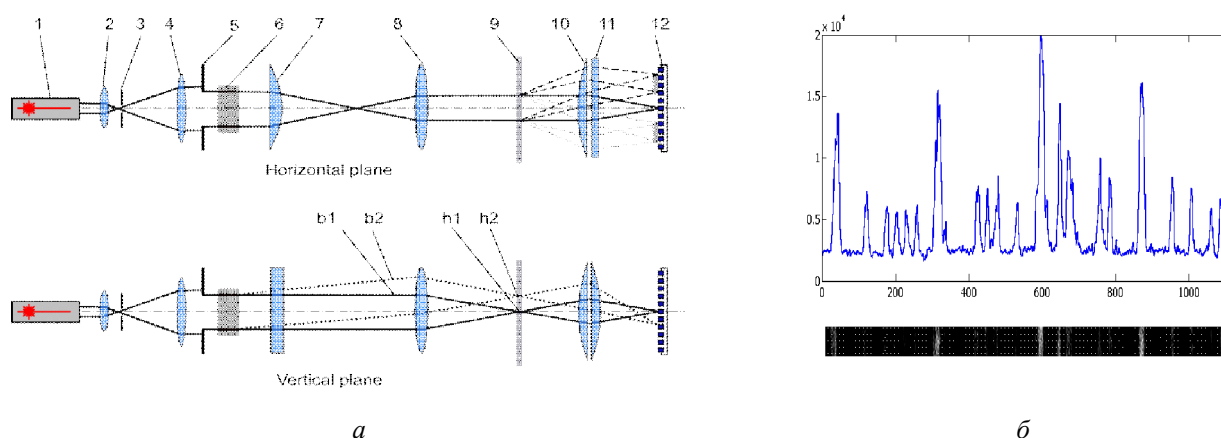


Рис.2. Схема по-строчного считывания компьютерно-синтезированных 1D-Фурье голограмм (а); элемент восстановленного с голограммы светового поля (б)

Экспериментальное моделирование обеих схем показало, что в случае по-страничного считывания, оптическая схема технически проще и обладает повышенной скоростью считывания информации, однако минимальный угол между ориентациями двух мультиплексированных голограмм составил 20° . В случае по-строчного считывания, минимальный угол оказался меньше и составил порядка 5° , однако в силу наличия в элементов, формирующих необходимый считывающий световой пучок, схема усложнилась.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF ONE-DIMENSIONAL FOURIER MICROHOLOGRAMS HOLOGRAPHIC MEMORY SYSTEM

*Donchenko S.S.¹, Betin A.Yu¹, Bobrinëv V.I.¹, Odinokov S.B.¹,
Zlokazov E.Yu², Starikov R.S.²*

(¹MSTU named after N.E. Bauman, Moscow;

²MEPhI, Moscow)

ПОРОЖДЕНИЕ ПОНЯТИЙ НАЛОЖЕННЫМИ ГОЛОГРАММАМИ

Павлов А.В., Кочетков П.В.

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург)

Метод наложенных голограмм (НГ) широко применяется в системах памяти [1-6]. Актуален поиск возможностей метода НГ по реализации более сложных моделей обработки информации. В том числе – индуктивного вывода.

Представленные в докладе результаты имеют два аспекта: практический и фундаментальный. Первый связан с развитием оптических информационных технологий – дана модель и показан механизм выделения методом НГ Фурье общих для набора изображений признаков. Дан анализ эффективности этого механизма в связи с характеристиками регистрирующих сред и изображений.

Второй аспект связан с развитием описания голографических схем по мере их усложнения. Показано, что схеме из двух $4f$ каскадов с НГ Фурье при записи серий пар образов, связанных общим опорным образом, адекватно описание в рамках уже не дедуктивного, но индуктивного вывода.

Пример индуктивного порождения понятий на основе силлогизма «Barbara»:

Случай: Сократ (S_i) человек (M)

Результат: Сократ (S_i) смертен (P_i)

Правило: Любой человек (M) смертен (P^C).

Имеется набор из n пар образов: все опорные образы S_i связаны как с общим для серии образом M (понятием), так и попарно с образами P_i . Последние включают как индивидуальные P_i^{Ind} , так и общие P_i^C признаки. Критерии различения индивидуальных и общих признаков априорно не заданы – P_i^{Ind} и P_i^C могут иметь идентичные характеристики и пространственно налагаться.

Для анализа набора $\{P_i\}$ с целью нахождения общих признаков, используем известное свойство функции корреляции (КФ) суммы случайных полей

$$K\left(\sum_{i=1}^n X_i(x, y)\right) = nK_{ii}(X_i(x, y)) + \sum_{i \neq j} K_{ij}(X_i(x, y)), \quad (1)$$

где K_{ij} – КФ i -го и j -го образов, $X_i(x, y)$ – образ как i -ая реализация однородного случайного поля. В предположении некоррелированности субпаттернов P_i^{Ind} , с ростом числа примеров n для суммарного субпаттерна общих признаков P_i^C

$$K^C\left(\sum_{i=1}^n P_i^C(x, y)\right) = n^2 \sigma_C^2(P_i^C(x, y)) = n^2 K^C(P_i^C(x, y)), \quad (2)$$

где σ_C^2 – дисперсия одного субпаттерна P_i^C , а для суммарного субпаттерна индивидуальных признаков P_i^{Ind} – (1). Частичная коррелированность P_i^{Ind} ведет к более быстрому, чем линейный, но менее, чем квадратичный от n , росту оценки.

Этот инструмент применим не только при пространственном разнесении субпаттернов общих и частных признаков, но и при их наложении:

$$K^\Sigma = n^2 K^C(P_i^C(x, y)) + nK_{ii}^{Ind}(P_i^{Ind}(x, y)) + \sum_{i \neq j} K_{ij}^{Ind}(P_i^{Ind}(x, y)). \quad (3)$$

Характер роста (1), (3) от n имеет вид

$$K \left(\sum_{i=1}^n (P_i^C(x, y) + P_i^{Ind}(x, y)) \right) \approx n^2 \sigma_C^2 L_x^C L_y^C + n \sigma_{Ind}^2 \left[L_x^{Ind} L_y^{Ind} + \sqrt{L_x^{Ind} L_y^{Ind} \frac{\pi}{2}} \right]. \quad (4)$$

Возможность реализации модели обусловлена тем, что мат. ожидание (МО) суммы случайных полей равно сумме их МО. Если все образы – реализации одного случайного поля, то с ростом числа записанных парциальных голограмм в составе НГ МО восстановленных НГ субпаттернов P_y^C и P_y^{Ind} будет одинаково, а дисперсии – существенно различаться. Схема, дана на рис. 1.

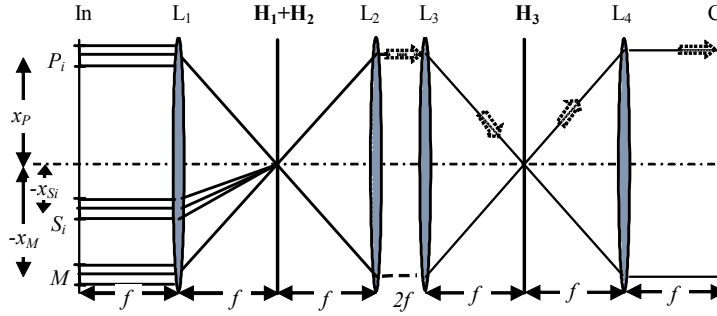


Рис.1. 8f схема голографии Фурье, реализующая индуктивное порождение понятий

Связи пар образов $S_i - M$ и $S_i - P_i$ реализуются голограммами Фурье H_{1i} и H_{2i} , образ S_i для каждого набора пар один и играет роль опорного.

В задней фокальной плоскости второй фурье-преобразующей линзы L_2 :

$$F[F(S_i)H(v)] = M(x - x_M) * (S_i \otimes S_i) + P_i(x + x_{P_i}) * (S_i \otimes S_i) + M(x + x_{S_i} - x_{S_j} - x_M) * (S_i \otimes S_j) + P_j(x + x_{S_i} - x_{S_j} + x_{P_j}) * (S_i \otimes S_j), \quad (5)$$

где $*$ и \otimes – символы операций свертки и корреляции. В (5) нас интересуют первые два слагаемых. Для связи восстановленных M и P_i . Записывается

$$H_{3i}(v) = F(S_i)F(M)F^*(S_i)F^*(S_i)F^*(P_i)F(S_i)\exp(-j\omega(x_M - x_{P_i})) + F^*(S_i)F^*(M)F(S_i)F(S_i)F(P_i)F^*(S_i)\exp(j\omega(x_M - x_{P_i})). \quad (6)$$

Если голограмма (6) освещается $F(M)$, то второе слагаемое в (6) даст

$$F[F(M)H_i^C(v)] = P_i^C(x + x_{P_i}) * [(M * (S_i \otimes S_i)) \otimes (M * (S_i \otimes S_i))] + P_i^{Ind}(x + x_{P_i}) * [(M * (S_i \otimes S_i)) \otimes (M * (S_i \otimes S_i))]. \quad (7)$$

Моделировалась запись голограмм и формирование изображения в схеме рис.1. Изображения моделировались реализациями стационарного случайного процесса с экспоненциальным спектром амплитуд и случайным спектром фаз, радиусом корреляции по уровню $0,5 r = 11$; длины всех реализаций 1024, т.е. оценка информационной емкости $\Omega = L/r = 93$. Образы P_i моделировались для:

1. Пространственного разнесения P_i^C и P_i^{Ind} , их длины $L = 512$, т.е. их информационная емкость оценивалась $\Omega^C = \Omega^{Ind} = L_x^C/r = L^{Ind}/r = 46,5$.

2. Пространственного наложения субпаттернов P^C_i и P^{Ind}_i , их длины $L^C = 512$, $L^{Ind} = 1024$ т.е. $\Omega^C = L^C/r = 46,5$ и $\Omega^{Ind} = L^{Ind}/r = 93$.

На рис. 2, а даны зависимости дисперсий для фрагментов восстановленных изображений $C P^C_y$ и P^{Ind}_y , соответствующих локализациям P^C_i и P^{Ind}_i в обучающих примерах, в зависимости от числа обучающих примеров n для пространственного разнесения и наложения P^C_i и P^{Ind}_i . На рис. 2, б для даны эти же зависимости, нормированные на максимальную амплитуду в восстановленном паттерне.

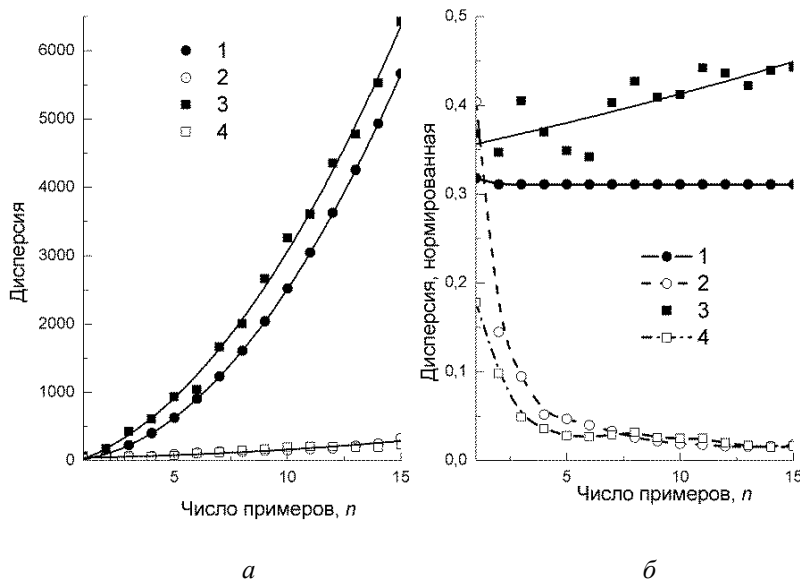


Рис. 2. Зависимости дисперсий восстановленных паттернов от числа НГ: 1 – P^C_y ; 2 – P^{Ind}_y при пространственном разнесении P^C_i и P^{Ind}_i ; 3 – P^C_y ; 4 – P^{Ind}_y при наложении P^C_i и P^{Ind}_i

Аппроксимация зависимостей на рис.2, а для случая без наложения:

$$\sigma_C^2 = -0,56 + 0,29N + 25,157N^2; \quad \sigma_{Ind}^2 = 14,77N + 0,25N^2,$$

т.е. согласно (2) и (1) фактически квадратичная для P^C_y , и линейная для P^{Ind}_y . При наложении P^C_i и P^{Ind}_i зависимость оценки от n сохраняет преимущественно квадратичный характер для P^C_y и преимущественно линейный для P^{Ind}_y

$$\sigma_C^2 = -80,37 + 85,22N + 22,99N^2; \quad \sigma_{Ind}^2 = -4,26 + 22,13N - 0,44N^2.$$

Таким образом, эффект обобщения работает и при пространственном наложении P^C_i и P^{Ind}_i . Эффективность растет с ростом числа НГ.

На рис. 3 даны результаты численного эксперимента – восстановленные паттерны понятия «смертности вообще», представленного условным изображением гробницы, в зависимости от числа НГ.

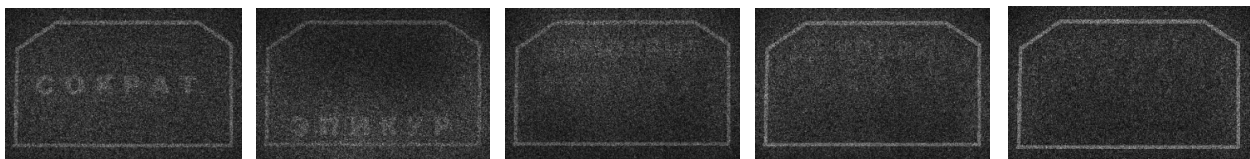


Рис. 3. Результаты численного эксперимента – восстановленный паттерн понятия в зависимости от числа наложенных голограмм (1 – 5)

Заключение

Таким образом, схема голографии Фурье с наложенными голограммами и угловым мультиплицированием опорного пучка, записанными с серии двух пар образов, каждая из которых объединена одним опорным, реализует модель индуктивного вывода. Вывод включает следующие этапы:

1. Запись наложенных голограмм связанных пар образов.
2. Запись наложенной голограммы восстановленных образов для выявления общего в записанных образах за счет свойства дисперсии суммы случайных процессов и формирование, на этой основе, нового образа.

Описанный метод свободен от требований на пространственные или спектральные различия общих и частных признаков запоминаемых изображений. Вместе с тем, он предполагает сохранение пространственной локализации субпаттернов общих признаков во всей серии изображений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 15-01-04111-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Heerden P.J.* Applied Optics. 1963. V. 2. № 4. P. 387–392.
2. *Van Heerden P.J.* Applied Optics. 1963. V. 2. № 4. P. 393–400.
3. *Микаэлян А.Л., Бобринев В.И.* ДАН СССР, 1970. Т. 191. № 4. С. 799.
4. *Микаэлян А.Л., Бобринев В.И.* Радиотехника, 1974. Т. 29. № 5. С. 7 – 18.
5. *Бетин А.Ю., Бобринев В.И., Евтихиев Н.Н. и др.* // Квантовая электроника 2013. Т. 43. № 1. С. 87–89.
6. *Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Odinokov S.B., et.al.* // Applied Optics. 2013. V. 52, №. 33. P. 8142 – 8145.

CONCEPT GENERATION BY SUPERIMPOSED FOURIER–HOLOGRAMS

Pavlov A.V., Kochetkov P.V.

(ITMO University, Saint-Petersburg)

A method for concept generation by superimposed holograms is proposed and investigated. The method includes two steps: inductive generalization as a way to reveal common features in the set of examples, and connections of the new concept with existed ones. The first step is implemented by Fourier-holography setup with superimposed holograms, the second one is implemented either by additional Fourier-holography setup, or by phase conjugation of the reconstructed by the hologram waves for new superimposed hologram to be recorded. Both theoretical analysis and computer simulation results are presented.

ФОТОННАЯ СИСТЕМА ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ С ГОЛОГРАММНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Морозов О.Г.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Введение

Фазированные антенные решетки находят широкое применение в радиолокации и технике связи для военных и гражданских применений. Среди гражданских применений выделим обеспечение спутниковой связи с передвижными транспортными средствами, для чего указанные решетки устанавливаются сегодня практически на все круизные лайнеры, яхты, поезда и т.д. При синтезе АФАР проектировщики столкнулись с рядом серьезных задач, среди которых наиболее важной являлась задача разработки системы распределения и передачи антенных сигналов, оказывающей существенное влияние на характеристики диаграммообразования и сканирования антенн. Исследовательские работы показали, что эта проблема может быть решена за счёт использования методов радиофотоники и голографии [1].

Применение интегральных элементов радиофотоники, волоконной оптики, голографии существенно улучшает технические характеристики радиолокаторов и их активных фазированных антенных решеток (АФАР), в которых используют как аналоговые, так и цифровые оптические технологии [2].

Ключевым элементом фотонных АФАР является система фотонного диаграммообразования (СФДО). С фотонным диаграммообразованием связывают такие преимущества АФАР, как малые размеры, малый вес, малые потери при широкой мгновенной полосе частот, малую подверженность действиям электромагнитных помех, гибкость при механической компоновке и при изменении некоторых ее параметров, возможность формирования многолучевых диаграмм направленности (ДН) с независимым управлением. Основным требованием к СФДО является отсутствие частотной зависимости положения луча при его сканировании, необходимость обеспечения стабильности фазы и фазовой задержки радиосигналов, управляющих элементами АФАР, с учетом существенного их влияния на характеристики диаграммообразования и сканирования антенн, а соответственно и радиолокаторов в целом.

1. Частотная зависимость положения основного луча ДН

Основным элементом современных АФАР является устройство управления фазой (УУФ), которое в силу своей «узкополосности» для рабочего диапазона частот определяет наличие частотной зависимости положения основного лепестка ДН. Другими словами при разных излучаемых частотах положение основного лепестка ДН перестает быть фиксированным и может зависеть от значения указанной частоты. Покажем эту зависимость [3].

Для формирования основного лепестка ДН в направлении угла θ к оси излучения необходимо использование УУФ с фазовой задержкой $\Delta\varphi$, которая определяется как:

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta L / \lambda = 2\pi d \sin \theta / \lambda. \quad (1)$$

Тогда угол θ , характеризующий направление луча, будет определен как:

$$\theta = \sin^{-1}(\lambda\Delta\varphi/2\pi d). \quad (2)$$

Анализ (2) позволяет установить зависимость угла θ от длины волны λ (или частоты) излучаемого сигнала и определяет возможность использования УУФ лишь в узкополосных приложениях.

Данная проблема может быть решена с использованием фотонного подхода, который называется True Time Delay Beamforming (от англ. – диаграммообразование с задержкой в реальном времени), при котором УУФ заменяется на линию задержки с длиной:

$$\Delta L = d \sin \theta. \quad (3)$$

Практическая реализация фотонной линии задержки с длиной ΔL предполагает модуляционное преобразование СВЧ сигналов на оптическую несущую, требуемую их временную задержку при распространении в оптическом волокне с некоторой дисперсией или в дисперсионном элементе, а затем обратное оптико-электронное преобразование в СВЧ сигнал. Учитывая «широкополосность» волоконно-оптических систем радиосвязи, равная задержка по времени может быть просто обеспечена для всего рабочего диапазона частот АФАР.

Тогда угол θ , характеризующий направление луча, будет определен как:

$$\theta = \sin^{-1}(\Delta L / d). \quad (4)$$

Анализ (4) показывает, что угол θ не зависит от длины волны λ или частоты излучаемого сигнала.

2. АФАР с фотонным диаграммообразованием

Среди различных вариантов реализации СФДО выделим системы на основе коммутируемых волоконно-оптических линии задержки (ВОЛЗ), системы, использующие одномодовые волоконные световоды с низкой и высокой дисперсией, системы на основе волоконных Брэгговских решетках (ВБР), системы с интегральным распределением и голограммным согласованием. Используя эти компоненты, СФДО могут быть построены в виде призмоподобной структуры из волоконных световодов с низкой и высокой дисперсией, дисперсионной матрицы ВРБ или матрицы голограммных решеток на блоке интегральных задержек. Для выполнения функции диаграммообразования СФДО должна обеспечить:

- 1) набор задержек с заданным декрементом для заданного положения ДН;
- 2) возможность дискретного или непрерывного изменения декремента для управления положением ДН.

Первая задача фотонного управления реализована в устройствах формирования луча выбором оптических элементов для задержки, в то время как вторая – перестройкой длины волны оптического источника в призмоподобном устройстве формирования ДН или коммутируемой матрицей в матричных устройствах диаграммообразования.

3. АФАР с СФДО на основе интегрального блока задержек и голограммных элементов ввода-вывода оптического излучения

В качестве проекта был взят вариант антенны Вивальди [4] с сегментом 2×2 и с системой фотонного диаграммообразования, представленной на рис. 1.

На рис. 1 представлен модельный вариант, при $i = 0$ $DL_0 = 0$. В реальных условиях ключевой элемент рассматриваемой СФДО, может быть реализован на коммутируемая ВОЛЗ с бинарным программируемым управлением задержкой в реальном масштабе времени. Оптическая несущая, промодулированная в диапазоне СВЧ, проходит через N ВОЛЗ, длины которых соответствуют задержкам, увеличивающимся по закону $2^i \Delta T$, где $i = 0, 1, \dots, N - 1$. Требующиеся для заданной суммарной задержки ВОЛЗ включаются в последовательную цепь с помощью N оптических переключателей 2×2 . Антенна Вивальди, как известно, представляет собой сверхширокополосный печатный излучатель, построенный на основе расширяю-

щейся щелевой линии [5]. Недостаток данной системы – сложность выполнения второго требования к СФДО АФАР.

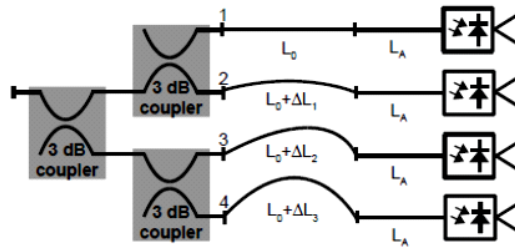


Рис. 1. Функциональная схема АФАР с СФДО на ВОЛЗ

Поэтому на стадии проектирования было решено использовать решение, аналогичное [6], представленное на рис. 2, заключающееся в применении голограммных элементов ввода-вывода оптического излучения.

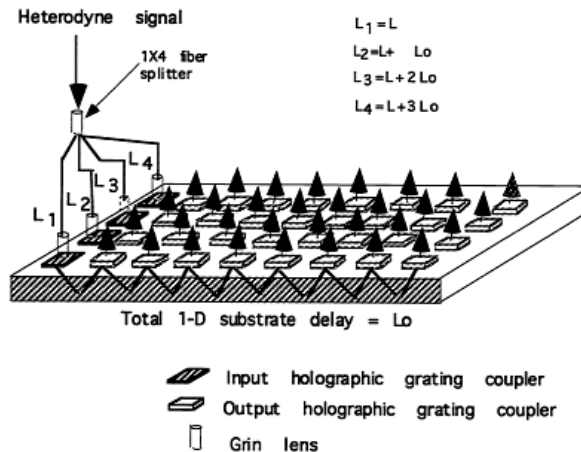


Рис. 2. СФДО на подложке с голограммными элементами ввода-вывода

Формирование задержек осуществляется в подложке с шагом $\Delta\tau : 0, \Delta\tau, \dots, 31 \Delta\tau$. Голограммные элементы предназначены для ввода и вывода оптического излучения ортогонально плоскости интегральной подложки.

4. Голограммные элементы ввода-вывода оптического излучения и установка для их записи

Голографические элементы ввода-вывода (ГЭВВ) [6] могут быть сделаны из галогенида серебра, дихромата желатина (DCG) и на основе фотополимерных голографических пленок. ГЭВВ на основе галогенида серебра характеризуются низким разрешением и высоким рассеянием. DCG пленки позволяют обеспечить высокий индекс модуляции и низкое рассеяние. Тем не менее, они сильно подвержены влиянию влажности и требуют герметизации. Фотополимерные пленки не требуют особых средств защиты от воздействия окружающей среды.

Фазовые объемные ГЭВВ формируются в фотополимерном материале с помощью станции оптической записи, которая производит пространственное изменение показателя преломления. Синусоидальное изменение показателя преломления в фотополимерных материалах порождается диффузией и миграцией фоточувствительных мономеров с последующим их закреплением. В соответствии с теорией связанных волн Когельника для тонких ГЭВВ

эффективность объемной передачи определяется синусоидальной функцией, которая является произведением толщины решетки на коэффициент модуляции. Выбрав правильную толщину пленки и коэффициентом модуляции, может быть реализована практически 99% эффективность передачи на определенной длине волны реконструкции. Дальнейшее увеличение толщины пленки приводит к снижению эффективности дифракции, такое состояние называют перемодуляцией. Управление эффективностью дифракции может осуществляться путем регулирования экспозиции или соотношением двух интерферирующих лучей записывающего лазера.

Для записи ГЭВВ была использована модернизированная станция записи ВБР на интерферометре Ллойда. На рис. 3 приведен общий вид станции записи ВБР, разработанной в лаборатории волоконной оптики Научного центра волоконной оптики при ИОФ РАН, реализованной в ИАЭ СО РАН и НГУ на базе собственного лазера и смонтированной в НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем КНИТУ-КАИ [7].



Рис. 3. Общий вид станции записи ГВЭЭ

В качестве источника непрерывного ультрафиолетового излучения 1 в установке используется лазерная система производства НГУ, состоящая из аргонового ионного лазера (с выходной мощностью 8 Вт на длине волны 488 нм) и блока внутрирезонаторного удвоения частоты на основе кристалла ВВО. Максимальная выходная мощность такой системы составляет около 0,5 Вт на длине волны $\lambda_{UV} = 244$ нм. Выходное лазерное излучение имеет следующие характеристики: диаметр пучка $\sim 1,5$ мм; угловая расходимость ~ 1 мрад; стабильность выходной мощности $-\pm 2\%$ в течение 1 часа.

Для выбора углов интерферометра Ллойда необходимо использовать специальные условия Брэгга [6].

Для формирования наклонной решетки, которая преобразует вертикальную входную волну в наклонную волну распространения света в подложке под углом α для ввода (и обратно для вывода) оптического излучения необходимо выбрать углы интерферометра θ_1 и θ_2 следующим образом:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{n_r} \sin \left[\frac{\alpha}{2} + \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_r} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \right] \right\}; \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{n_r} \sin \left[\frac{\alpha}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_r} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где n – средний показатель преломления ГВЭЭ, n_r – показатель преломления окружающей среды, λ_b и λ_r – длины волн записи и воспроизведения голограммы.

На выходе каждого ГВЭЭ устанавливаются одномодовые волокна SMF-28, по которым излучение поступает на излучающие элементы на основе антенн Вивальди.

5. Краткие выводы

Применение интегральных элементов радиофотоники, волоконной оптики и голографии существенно улучшает технические характеристики радиолокаторов и их АФАР. С фотонным диаграммообразованием связывают такие преимущества АФАР, как малые размеры, малый вес, малые потери при широкой мгновенной полосе рабочих частот, малую подверженность действиям электромагнитных помех, гибкость при механической компоновке и при изменении некоторых ее параметров, отсутствие частотной зависимости положения луча при его сканировании, возможность формирования многолучевых диаграмм с независимым управлением. Среди различных вариантов реализации СФДО выделим, как наиболее работоспособные, системы на основе ГВЭЭ, установка и принципы изготовления которых освещены в настоящей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского ГТУ, серия РиИС. 2014. № 1. С. 6–42.
2. Антенно-фидерные устройства СВЧ. Под ред. Ю.Е. Седельникова. Казань: ЗАО «Новое знание», 2014. – 128 с.
3. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature photonics. 2007. V. 1. P. 319-330.
4. Niels Neumann, Robert Trieb, Dirk Plettemeier. Integrated photonic antenna array // Proc. of SPIE. 2013. V. 8787. P. 878705.
4. Латынова А.Ф. Исследование возможности применения антенн Вивальди, нагруженных сосредоточенными элементами, в качестве радиопоглощающей структуры // ТТР. 2014. № 3. С. 84-90.
5. Chen R.T., Li R.L.Q. Holographic optical elements for TTD aimed at phased array antenna applications // Proc. of SPIE. 1996. V. 2689. P. 176-187.
6. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств. М.: НЦВО РАН, 2004. – 46 с.

PHOTON BEAMFORMING SYSTEM WITH HOLOGRAPHIC ELEMENTS FOR PHASED ARRAY ANTENNAS

Morozov O.G.

(Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI)

Introduction

A key element of active phased array antennas (APAA) is a photonic system of beamforming (PSBF) [1, 2]. The main requirement for the PSBF presents lack of frequency dependence of the beam as it scans [2], the well-known beam squint problem, limiting the APAA for narrowband operations. For many applications, however, it is highly desirable that the phase array antennas can operate in a broad band.

1. Solution of squint phenomenon

An effective solution squint phenomenon is to use true-time delay beamforming. The problem can be solved if a true-time delay line replaces the narrow band phase shifter where a true-time delay line with a length ΔL is used:

$$\Delta L = d \sin \theta. \quad (1)$$

The beam pointing direction is now given by:

$$\theta = \sin^{-1}(\Delta L / d). \quad (2)$$

It can be seen from (2), that the beam pointing direction is independent of the microwave frequency. A wide instantaneous bandwidth operation that is squint free is ensured.

2. PSBF with holographic grating

Vivaldi antenna structures provide huge bandwidths and can easily be manufactured in standard PCB processes. For the further experiments, a 2x2 setup was chosen [3]. The disadvantage of this system – complexity of the true-time delay line tuning. For research we choose the true-time-delay formation scheme [4], which is shown in the fig. 1, where waveguide-hologram strips have thicknesses $h, h + \Delta h, \dots, h + n \Delta h$. A holographic grating is fabricated on top of each strip, and the grating structure of the each strip is the same. For vertically incident beams, they have the same diffraction angles within the strips.

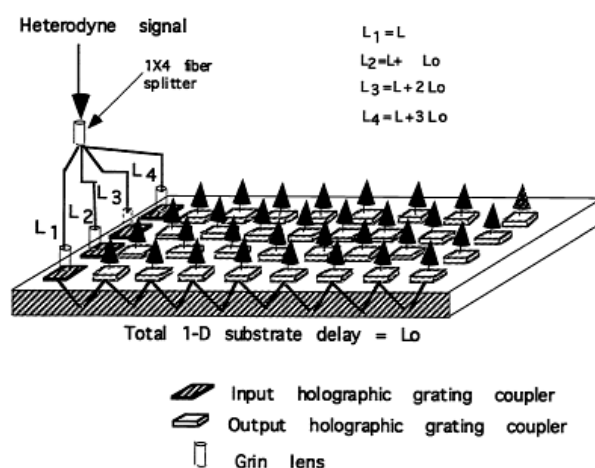


Fig. 1. PSBF with holographic grating

3. Holographic grating for laser fanout

Optical fanout of various delay lines are accomplished by holographic volume phase grating couplers. These gratings couple the light into and out of substrate modes from the surface-normal direction (fig. 1). Holographic couplers can be made from silver halide, dichromated gelatin (DCG) films and from photopolymer holographic recording films. Silver halide suffers from lower resolution and higher scatter. DCG has excellent holographic performance (high index modulation) and low scatter. However, DCG is seriously affected by raw material variability, requires complex wet processing and final holograms must be hermetically sealed to ensure environmental stability. Photopolymer films do not require wet processing and particular means to protect the finished hologram and it is easier to use and handle.

Volume phase holograms are formed in the photopolymer material through optical recording, which produces a spatial variation in refractive index. The diffusion and migration of photosensitive monomers and the subsequent fixing of these monomers generate the sinusoidal index of refraction variation in the photopolymer material.

To record the holographic couplers it was used upgraded station for fiber Bragg grating (FBG) writing with Lloyd's interferometer [5]. The common view of the station for FBG writing developed in the laboratory of FORC RAS, implemented in IAE SB RAS and NSU based on its own laser, and

assembled in the Institute of Applied Electromagnetics, Photonics and Living Systems KNRTU-KAI is shown on fig. 2.



Fig. 2. Laser station for HG writing

Design of holographic gratings is accomplished by constructing a grating vector such that a specific phase matching condition can be met. Notice that a particular design is for operation at a special Bragg diffraction angle and a specific display wavelength. To form a slanted grating coupler, which converts a vertical incident wave to a TIR with bouncing angle α in the substrate, the two incident angles of the recording beam with respect to the surface normal of the film are [4]:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{n_r} \sin \left[\frac{\alpha}{2} + \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_r} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \right] \right\}; \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{n_r} \sin \left[\frac{\alpha}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_r} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

where n is the average refractive index of the holographic material, n_r the refractive index of the medium on top of the holographic emulsion ($n_r = 1$ for air), λ_b and λ_r represent the wavelengths of the recording and display (reconstruction) waves, respectively.

5. Conclusion

Among the various PSBF embodiments, it was selected system with holographic gratings as the most workable. Installation and principles of holographic grating manufacturing are covered in this paper.

REFERENCES

1. *Jianping Yao*. A Tutorial on Microwave Photonics // IEEE photonics society newsletter. 2012. V. 26. № 3. P. 5-12.
2. *Capmany J., Novak D.* Microwave photonics combines two worlds // Nature photonics. 2007. V. 1. P. 319-330.
3. *Niels Neumann, Robert Trieb, Dirk Plettemeier.* Integrated photonic antenna array // Proc. of SPIE. 2013. V. 8787. P. 878705.
4. *Chen R.T., Li R.L.Q.* Holographic optical elements for TTD aimed at phased array antenna applications // Proc. of SPIE. 1996. V. 2689. P. 176-187.
5. *Abdullina S.R., Vlasov A.A.* Suppression of side lobes in the fiber Bragg grating reflection spectrum // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2014. V. 50. No 1. P. 75-86.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛОПАТКАМ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

В процессе работы лопатки компрессоров и турбин двигателя испытывают изгибные, крутильные, изгибно-крутильные колебания. В ряде случаев при наступлении резонанса, то есть при совпадении внешней возмущающей периодической силы с их собственной частотой, лопатки разрушаются [1].

Поэтому у лопаток компрессоров и турбин контролируют резонансные характеристики: резонансные формы и частоты колебаний. У наиболее ответственных изделий, например, газотурбинные авиационные двигатели (ГТД), регистрируют несколько первых резонансных форм и частот колебаний [2].

Резонансная форма колебаний представляет собой стоячую волну, сформированную в ограниченном пространстве тела лопатки, с образованием чередующихся узловых (поперечных и продольных) линий и участков пучностей. Визуализировать такую стоячую волну можно, применяя метод голографической интерферометрии с усреднением по времени [3]. На записываемой голограмме происходит интерферометрическое сравнение крайних амплитудных положений лопатки. На интерферограмме, полученной голографическим способом, яркие белые участки соответствуют узловым линиям – местам отсутствия перемещений на поверхности объекта. Чередующиеся тёмные и светлые полосы – линии равных перемещений – показывают места смещений плоскости лопатки от положения равновесия в процессе колебаний. Каждой резонансной частоте присуща определённая форма колебаний. Следует отметить, что при малых потерях энергии резонансная частота (форма) совпадает с собственной частотой (формой) объекта.

На рис. 1, *а*, *б* представлены интерферограммы колебаний лопатки компрессора (*а*) и турбины (*б*). У лопатки компрессора ГТД при данной резонансной частоте наблюдается форма колебаний, состоящая из двух поперечных узловых линий, так называемых изгибных колебаний, и одной узловой линии крутильных колебаний. Для данной лопатки эта форма колебаний имеет четвёртый порядковый номер. Интерферограмма той же формы, но у лопатки турбины ГТД приведена на рис. 1, *б*. Искривление узловых линий и линий равных перемещений на интерферограмме объясняется закруткой и переменной площадью поперечных сечений пера лопаток. Искривлённость узловых линий затрудняет анализ интерферограммы, появляется возможность пропуска той или иной порядковой формы.

Часто экспериментатор не может спрогнозировать последующую форму колебаний. Поэтому возникает необходимость в составлении опорных эталонных таблиц форм резонансных колебаний, позволяющих прогнозировать появляющиеся формы колебаний.

Чтобы устранить искривление узловых линий, затрудняющих анализ интерферограммы, необходимо формы колебаний определять для прототипа геометрически правильной формы. Для лопаток компрессора и турбины ГТД такими прототипами являются прямоугольные консольно закреплённые пластины постоянной толщины.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям консольно закреплённых пластин посвящено сравнительно мало работ. В них приводятся интерферограммы всего 3 – 5-ти первых форм колебаний пластин. А в нашей практике наблюдались разрушения лопаток на 8 – 9-той порядковой резонансной форме колебаний.

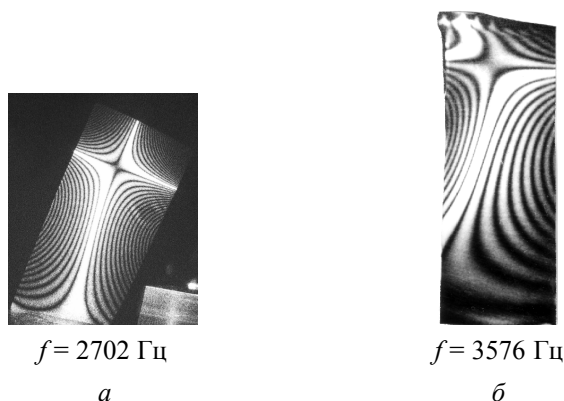


Рис. 1. Картины форм колебаний лопатки компрессора (*a*) и турбины (*б*), полученные голографическим методом усреднения по времени

Поэтому целью настоящей работы являлось получение и составление систематизированных таблиц 20 – 25-ти форм колебаний. Кроме того, исследовались влияния на формы колебаний материала и размеров пластин.

Экспериментальные исследования резонансных форм колебаний прямоугольных пластин постоянной толщины проводились голографическим методом усреднения по времени [4].

Для исследования были выбраны пластины толщиной $h = 1 - 2$ мм, шириной $b = 20, 30, 40, 60$ мм, длиной l от 20 до 200 мм, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, алюминиевого Д16Т, титанового сплава ОТ4-1 и никельхромового сплава ХН77ТЮР.

На рис. 2 приведена экспериментально полученная таблица форм колебаний прямоугольной пластины.

<i>b</i>	<i>l</i>				
	0	1	2	3	4
1	F_{10} 1 $f = 96 \text{ Гц}$	F_{11} 2 $f = 331 \text{ Гц}$	F_{12} 5 $f = 1773 \text{ Гц}$	F_{13} 12 $f = 4439 \text{ Гц}$	F_{14} 20 $f = 8567 \text{ Гц}$
	F_{20} 3 $f = 607 \text{ Гц}$	F_{21} 4 $f = 1105 \text{ Гц}$	F_{22} 8 $f = 2537 \text{ Гц}$	F_{23} 13 $f = 5173 \text{ Гц}$	F_{24} 21 $f = 9227 \text{ Гц}$
	F_{30} 6 $f = 1800 \text{ Гц}$	F_{31} 7 $f = 2281 \text{ Гц}$	F_{32} 10 $f = 3875 \text{ Гц}$	F_{33} 17 $f = 6559 \text{ Гц}$	F_{34} 22 $f = 10422 \text{ Гц}$
	F_{40} 9 $f = 3341 \text{ Гц}$	F_{41} 11 $f = 3929 \text{ Гц}$	F_{42} 15 $f = 5710 \text{ Гц}$	F_{43} 19 $f = 8415 \text{ Гц}$	F_{44} 24 $f = 12430 \text{ Гц}$
	F_{50} 14 $f = 5578 \text{ Гц}$	F_{51} 16 $f = 6134 \text{ Гц}$	F_{52} 18 $f = 7909 \text{ Гц}$	F_{53} 23 $f = 10993 \text{ Гц}$	F_{54} 25 $f = 14815 \text{ Гц}$

Рис. 2. Систематизированный по числу *b* и *l* спектр резонансных форм и частот колебаний прямоугольной консольно закреплённой пластины постоянной толщины, полученный экспериментально

Для каждой формы колебаний установлены резонансные частоты, порядковый номер появления. Форма колебаний обозначена символом F_{bl} , где b – число поперечных узловых линий изгибных колебаний, l – число продольных узловых крутильных колебаний. Формы колебаний, представленные в таблице, систематизированы по числам b и l . Так, например, в первом ряду расположены формы с одной поперечной узловой линией изгибных колебаний, то есть $b = 1$ и $l = 0, 1, 2, 3, 4$ ($F_{10}, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}$). В правом верхнем углу каждой ячейки указан порядковый номер появления формы колебаний. Для прямоугольной пластины аналогичная форма является также по порядку четвертой и имеет схожий с лопатками рисунок (см. рис. 1).

Экспериментально установлено, что для исследованных материалов форма колебаний не зависит от материала и толщины пластины. Следовательно, приведённая таблица интерферограмм форм колебаний справедлива для всех исследованных материалов и толщин пластин h от 1 до 3 мм.

Полученные опорные систематизированные таблицы интерферограмм форм колебаний прямоугольных пластин, полученные классическим наиболее точным методом голографической интерферометрии, позволяют исключить пропуски и прогнозировать пропущенные формы колебаний, свести интерферограммы форм колебаний реальных лопаток компрессоров и турбин двигателей к эталонным классическим формам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаева Р.Х., Хабибуллин М.Г., Каримов А.Х. Голографическая интерферометрия при конструкторской доводке лопаток компрессора ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1999. – № 2. – С. 72 – 74.
2. Жужукин А.И. Применение голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрационных характеристик деталей. Материалы докладов Международной н.-т. к. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: СГАУ, 2009, С. 148 – 149.
3. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977 – 339 с.
4. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии // Изв. Вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 1. – С. 78– 80.

HOLOGRAPHIC INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF RECTANGULAR PLATES AS APPLIED TO THE BLADES OF AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINES

Makaeva R.H., Karimov A.K., Tsarev A.M.

*(Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev
(KNRTU-KAI), Kazan)*

The article investigates the vibrations of rectangular cantilever plates as applied to the blades of the turbine and compressor GTE using holographic interferometry.

It was shown that prototypes of the blades - plate - have similar in resonant mode shapes. The systematized table of mode shapes, obtained experimentally, can be a reference in the research of spectrum of the natural vibration frequencies of the real details.

МАКЕТ ПОГРУЖАЕМОГО ЦИФРОВОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНКТОНА И ДРУГИХ ЧАСТИЦ В ВОДЕ

Дёмин В.В., Половцев И.Г., Ольшукоев А.С., Каменев Д.В.

(Томский государственный университет, г. Томск)

Аннотация

Разработан макет погружаемого голографического модуля для исследования взвешенных и оседающих частиц в воде. Рассмотрены особенности оптико-электронной части, а также методы обработки и извлечения информации из голографических данных. Представлены предварительные результаты апробации в лабораторных условиях.

Исследование взвешенных и оседающих частиц в природных водных объектах представляет собой актуальную задачу. В частности, планктон является кормовой базой многих видов промысловых видов рыб, а также может служить биоиндикатором экологического состояния акватории. Задача изучения поведения и особенностей планктонных особей является достаточно сложной, поскольку эти частицы имеют сложную форму, являются полупрозрачными, быстро движущимися и расположены в воде. Применение голографических методов позволяет бесконтактно получить уникальную информацию о скорости и траектории движения каждой частицы во всем исследуемом объёме, определить их размеры, форму, концентрацию, что невозможно получить традиционными методами исследования планктона.

Для исследования взвешенных и оседающих частиц в естественной среде разрабатывается аппаратно-программный комплекс. Аппаратная часть состоит из надводной и подводной частей. Надводная часть включает место оператора (судовой компьютер, он необходим для управления всем комплексом, а также обработки цифровых голограмм), лебёдки с грузонесущим кабель-тросом с каналом электропитания и оптоволоконным информационным каналом.

Подводная аппаратная часть (погружаемый модуль) комплекса для регистрации голограмм взвешенных и оседающих частиц в природных водных объектах представляет собой два герметичных корпуса с герморазъёмами (рис. 1). В одном корпусе (передатчик, I) расположен полупроводниковый лазер, расширитель лазерного пучка, который формирует пучок с заданными геометрическими параметрами, устройство управления электропитанием, аккумуляторные батареи. Во втором (II): приёмник оптического излучения, оптическая схема для приёма оптического излучения, устройство управления режимами работы, устройство хранения информации и устройство синхронизации работы всех компонентов.

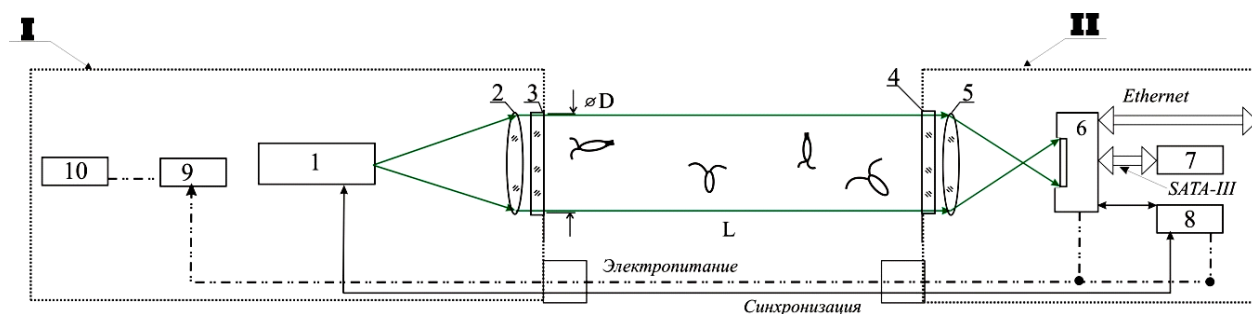


Рис. 1. Функциональная схема макета погружаемого голографического модуля:

- 1 – лазер; 2 – расширитель лазерного пучка; 3, 4 – иллюминаторы; 5 – объектив приемника; 6 – смарт-камера;
7 – устройство накопления и хранения данных (флэш-память); 8 – устройство синхронизации;
9 – устройство управления электропитанием; 10 – аккумуляторы

Рассмотрим оптическую схему: когерентное излучение лазера *1* проходит оптическую систему *2*, где пучок расширяется до необходимого диаметра и коллимируется. После прохождения через иллюминатор *3* излучение просвечивает исследуемый объём (диаметр *D*, длина *L*), часть излучения рассеивается на частицах и представляет собой предметную волну, часть проходит мимо без изменения (опорная волна). Излучение проходит через иллюминатор *4* приёмного корпуса, объектив *5*, который используется для (согласования поля изображения и фотоприёмной матрицы). Таким способом достигается увеличение исследуемого объёма в поперечном размере. Интерференционная картина предметной и опорной волн регистрируется ПЗС-камерой *6*, которая оснащена контроллером управления режимами работы, предварительной обработки и передачи данных.

При использовании непрерывного источника излучения скорости регистрируемых частиц ограничиваются временем экспозиции камеры (как правило, минимальное время экспозиции около 10 мкс, что позволяет зарегистрировать частицу размером 50 мкм, движущуюся со скоростью 0,25 м/с). Применение импульсного полупроводникового лазера позволяет регистрировать частицы с более высокими скоростями, а также использовать аппаратно-программный комплекс в режиме буксирования.

Голограммы, зарегистрированные ПЗС-камерой, сохраняются в накопителе *7* и передаются по оптоволоконному каналу связи в судовой компьютер.

На рис. 2 представлена фотография лабораторного макета погружаемого голографического модуля аппаратно-программного комплекса.

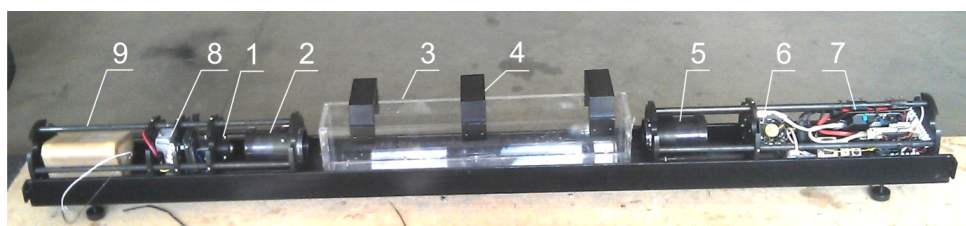


Рис. 2. Фотография макета погружаемого голографического модуля аппаратно-программного комплекса: *1* – лазер; *2* – расширитель лазерного пучка; *3* – кювета; *4* – держатели для тестовых объектов; *5* – объектив приемника; *6* – смарт-камера; *7* – устройство накопления; *8* – устройство синхронизации; *9* – аккумуляторы

Макет разработан и изготовлен для отработки режимов регистрации цифровых голограмм взвешенных и оседающих частиц, калибровки метрологических характеристик и оптимизации взаимного размещения электронных и оптических элементов внутри герметичного погружаемого корпуса.

Для восстановления, обработки и извлечения информации из цифровых голограмм (рис. 3) разработана программная часть комплекса. В состав программной части комплекса входит блок восстановления цифровых голограмм, который основан на численном расчёте дифракционного интеграла Кирхгофа в приближении Френеля [1]. В результате восстановления формируется набор изображений сечений исследуемого объёма с частицами (рис. 4).

В блоке построения траектории частиц по данным из цифровых голограмм анализируются восстановленные изображения и определяются координаты частиц. При этом продольная координата частицы соответствует плоскости наилучшей фокусировки ее изображения, которая в свою очередь определяется по критерию граничного контраста [2]. Поперечными координатами частицы считаются координаты центра тяжести изображения частицы в этой плоскости. При регистрации временной последовательности голограмм появляется возможность построить траекторию движения частицы (рис. 5).

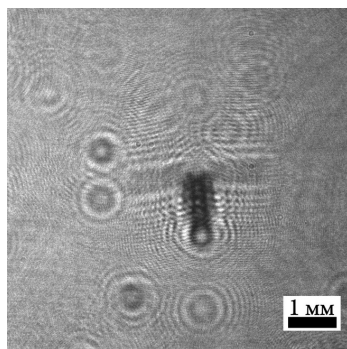


Рис. 3. Цифровая голограмма планктонной частицы

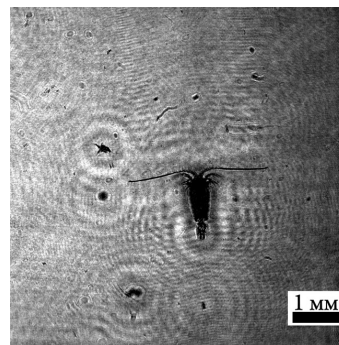


Рис. 4. Восстановленное изображение планктонной частицы

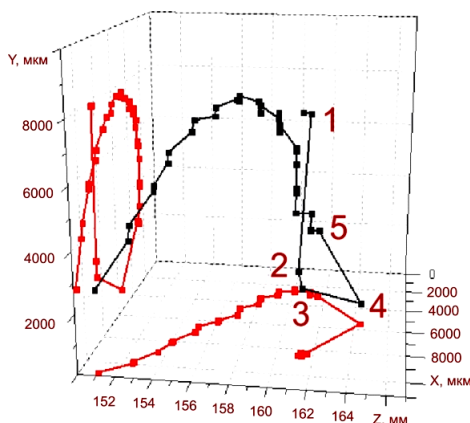


Рис. 5. Траектория движения планктонной частицы, построенная по данным из временной последовательности цифровых голограмм

Программная часть комплекса имеет модульную структуру и может быть дополнена другими блоками, в частности, блоком автоматического создания цифрового голографического видео.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schnars U. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques / Schnars U., Jueptner W. – Berlin: Springer, 2005. – 164 p.
2. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Критерии качества изображений в цифровой голографии частиц // Оптический журнал. 2012. – Т. 79. № 4. С. 17-21.

MODEL OF SUBMERSIBLE DIGITAL HOLOGRAPHIC MODULE FOR STUDY PLANKTON AND OTHER PARTICLES IN WATER

Dyomin V., Polovtsev I., Olshukov A., and Kamenev D.
(National Research Tomsk State University, Tomsk)

Абстракт

The model of submersible holographic module is developed for investigation the suspended and settling particles in water.

The features of optical and electronic parts of the module are described as well as the methods for extracting information from the holographic data. The results of laboratory testing experiments are discussed.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В ОБЪЁМЕ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРУ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Дёмин В.В., Каменев Д.В.

(Томский государственный университет, г. Томск)

Аннотация

Предложен метод автоматической оценки интегральных характеристик частиц объёма по голограмме ансамбля частиц. Выполнена экспериментальная апробация метода. Отработана методика построения распределения частиц по размерам и оценки концентрации.

В настоящее время методы цифровой голографии имеют широкий спектр применений, одним из которых является исследование микрочастиц, расположенных в объёме среды. Подобными частицами могут быть продукты горения, оседающие частицы, аэрозоли, двухфазные потоки и другие [1-5]. По сравнению с традиционными способами изучения ансамблей частиц, методы цифровой голографии позволяют регистрировать объём достаточно большой глубины и одновременно обеспечивают высокое разрешение. По результатам обработки голографических данных получают уникальную информацию как обо всём зарегистрированном объёме в целом, так и о каждой частице в частности. Одно из наиболее существенных преимуществ цифровой голографии заключается в возможности исследования ансамбля частиц в динамике, а при создании специализированного аппаратно-программного комплекса возможна обработка информации в режиме реального времени [6].

В ряде задач практический интерес представляют не параметры отдельных частиц объёма, а их усреднённые величины и/или статистические характеристики, такие как средний размер частиц, концентрация частиц в объёме, распределения частиц по размерам, в пространстве, неоднородности концентрации частиц в объёме, и другие. Эти характеристики могут быть оперативно получены из голограммы, за счёт совершенствования алгоритма обработки данных, восстанавливаемых из цифровых голограмм частиц. Отметим, что для таких задач форма частиц, как правило, не представляет интереса, а на этапе расчёта характеристик ансамбля частиц можно считать, что все частицы имеют сечение, близкое к кругу или овалу.

Голографический метод исследования частиц является двухэтапным: вначале регистрируется голограмма исследуемого объема среды, содержащего частицы, затем восстанавливаются и анализируются голографические изображения частиц. Традиционно используемая процедура послойного восстановления с цифровых голограмм изображения зарегистрированного объема среды с частицами не позволяет оперативно получить информацию о количестве (концентрации) зарегистрированных частиц и их распределении по размерам. При этом для определения параметров каждой частицы и их усреднения по всем частицам важна качественная визуализация восстановленных изображений.

На рис. 1, *а* приведён пример зарегистрированной голограммы пузырьков воздуха в воде. При восстановлении из нее голографических изображений на различных расстояниях можно послойно исследовать объём с частицами. На рис. 1, *б-ж* представлены примеры восстановленных изображений, на которых часть частиц объёма сфокусирована. Расстояния восстановления в приведённом примере составляют 124, 145, 153, 161, 171 и 180 (рис. 1, *б-ж*).

Для визуализации голографического изображения и извлечения информации о зарегистрированных на голограмме частицах предлагается использовать двумерное отображение го-

логографического изображения [7], на котором представлены все частицы объёма. Учитывая тот факт, что информация о форме частиц не представляет интерес, предлагается использовать при формировании двумерного отображения метод продольной интенсивности [8]. Пример двумерного отображения приведён на рис. 1, *ж*. Такое отображение восстановленных голографических данных значительно более удобно для обработки и извлечения информации (например, концентрации или распределения частиц по размерам), чем работа с множеством изображений плоских сечений объёма, количество которых может составлять несколько сотен.

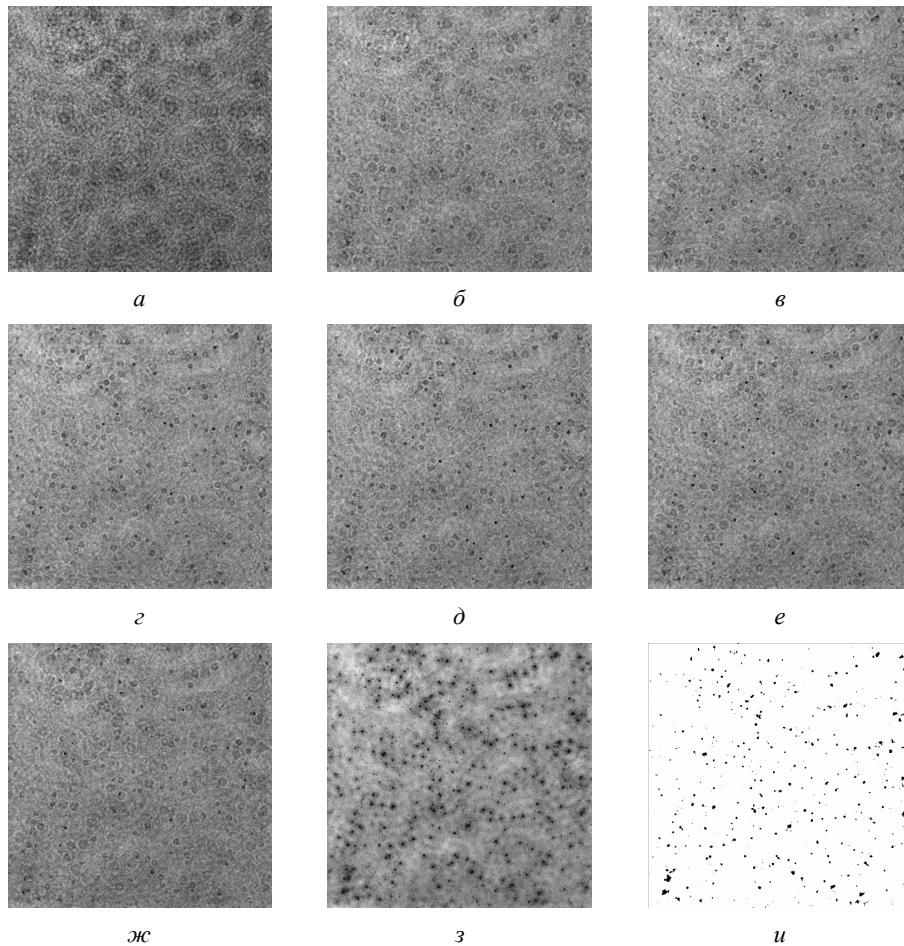


Рис. 1. Пример восстановления цифровой голограммы пузырьков воздуха в воде и формирование двумерного отображения голографического изображения: *а* – цифровая голограмма частиц; *б-ж* – изображения, восстановленные на расстояниях (*б* – 124 мм, *в* – 145 мм, *г* – 153 мм, *д* – 161 мм, *е* – 171 мм, *ж* – 180 мм); *з* – двумерное отображение голографического изображения, *и* – результат бинаризации двумерного отображения

На рис. 1, *и* приведён результат бинаризации двумерного отображения (рис. 1, *з*), по которому предлагается определять необходимые параметры ансамбля частиц. Поскольку определение концентрации частиц и их распределения по размерам сводится к работе с двумерным отображением, в качестве изображения для отработки методики определения параметров ансамбля использовалось изображение монослоя частиц песка, восстановленное из цифровой голограммы (рис. 2, *а*). Пример его обработки и бинаризации приведён на рис. 2, *б*.

Для одновременного определения концентрации частиц и распределения их по размерам в настоящей работе предложен метод, основанный на последовательном использовании операции эрозии [9] с размером примитива 3x3 пикселя задаваемое количество раз. По мере применения операции эрозии к обрабатываемому изображению, на нём будут исчезать изображе-

ния частиц того или иного размера. Размер исчезнувших изображений частиц l будет определяться как $l = 2 \cdot dx \cdot N$, где dx – размер пикселя изображения, N – количество применений операции эрозии. Изображения частиц, исчезнувшие на определённом этапе применения операции эрозии, выделяются, подсчитываются и заносятся в таблицу, представляющую собой распределение частиц по размерам. Для расчёта концентрации частиц в объёме достаточно просуммировать количество частиц всех размеров. На рис. 2, *в-е* показано, как при последовательном применении операции эрозии исчезают изображения частиц определённых размеров. Результат работы программного обеспечения, выполняющего автоматический расчёт распределения частиц по размерам, представлен на рис. 2, *ж*. На основании расчёта установлено, что общее количество зарегистрированных частиц составляет 234.

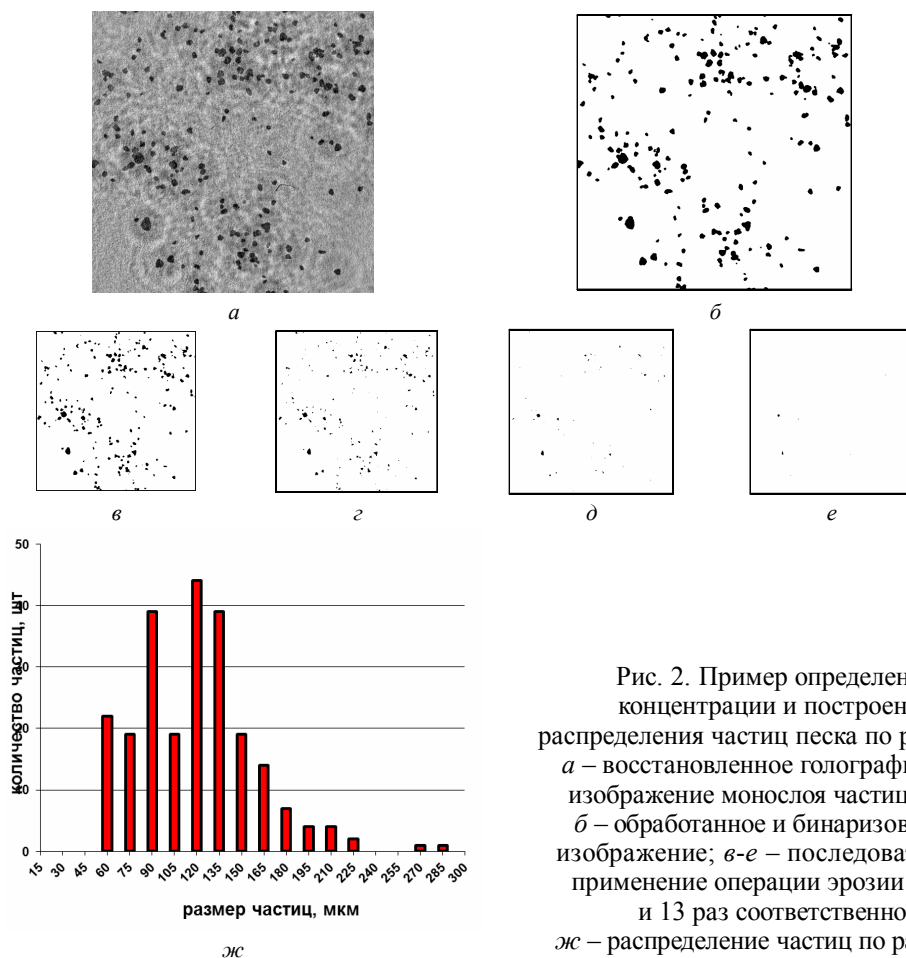


Рис. 2. Пример определения концентрации и построения распределения частиц песка по размерам: *а* – восстановленное голографическое изображение монослоя частиц песка; *б* – обработанное и бинаризованное изображение; *в-е* – последовательное применение операции эрозии 1, 5, 9 и 13 раз соответственно; *ж* – распределение частиц по размерам

Предложенный метод позволяет значительно упростить и повысить эффективность обработки данных, восстанавливаемых из цифровых голограмм, особенно при получении интегральных (усредненных по ансамблю частиц) характеристик. В докладе рассмотрены также способы оптимизации работы алгоритма и повышения его быстродействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин В.В., Степанов С.Г. Исследование ориентационных характеристик модельных кристаллических аэрозолей голографическим методом // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 9. – С. 833-836.
2. Katz J., Sheng J. Application of Holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics // Annu. Rev. Fluid Mechanics. – 2010. – Vol. 42. – P. 531-555.

3. Zhang J., Zhang J., Tao B., Katz J. Turbulent flow measurement in a square duct with hybrid holographic PIV // Exp. Fluids. – 1997. – Vol.23. – P. 373–381.
4. Демин В.В., Ольшукوف А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана, 2008, Т. 21, № 12. – С. 1089 – 1095.
5. Fugal J.P., and Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Tech., 2, 259–271. 2009.
6. Reid I.D., Nebrensky J.J., Hobson P.R. Challenges in using GPUs for the reconstruction of digital hologram images // 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 368 012025.
7. Dyomin V.V., Kamenev D.V. Two-dimensional representation of a digital holographic image of the volume of a medium with particles as a method of depicting and processing information concerning the particles // Journal of Optical Technology, 2013. V. 80. № 7. P. 450–456.
8. Choo Y.J., Kang B.S. The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography // Meas. Sci. Technol. – 2006. –V. 17. – P. 761–770.
9. Прэнтл У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2 – 480 с.

THE ALGORITHM OF AUTOMATIC CALCULATION OF PARTICLES CONCENTRATION AND THEIR SIZE DISTRIBUTION ON THE BASE OF HOLOGRAPHIC DATA

Demin V.V., Kamenev D.V.

(Tomsk State University, Toms)

Abstrakt

Method of automatic estimation of particles integral characteristics from holographic image of particle ensemble is suggested. The method experimental approbation is performed. The algorithm of particles size distribution and concentration estimation is tested.

REFERENCES

1. Dyomin V.V., Stepanov S.G. Study of Orientation Characteristics of Model Crystalline Aerosols by Holographic Method // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2000. Vol. 13. № 9. P. 773-776.
2. Katz J., Sheng J. Application of Holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics // Annu. Rev. Fluid Mechanics. – 2010. – Vol. 42. – P. 531-555.
3. Zhang J., Zhang J., Tao B., Katz J. Turbulent flow measurement in a square duct with hybrid holographic PIV //Exp. Fluids. – 1997. – Vol. 23. – P. 373–381.
4. Dyomin V.V., Olshukov A.S., Naumova E. Yu., Melnik N.G. Digital Holography of Plankton // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2008. Vol. 21. № 12. – P. 951–956.
5. Fugal J.P., and Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Tech., 2, 259–271, 2009.
6. Reid I.D., Nebrensky J.J., Hobson P.R. Challenges in using GPUs for the reconstruction of digital hologram images // 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 368 012025.
7. Dyomin V.V., Kamenev D.V. Two-dimensional representation of a digital holographic image of the volume of a medium with particles as a method of depicting and processing information concerning the particles // Journal of Optical Technology, 2013. V. 80. № 7. P. 450–456.
8. Choo Y.J., Kang B.S. The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography // Meas. Sci. Technol. – 2006. –V. 17. – P. 761–770.
9. Pratt W.K. Digital Image Processing CRC Press, 2013. – 756 p.

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Шандаров С.М.,¹ Буримов Н.И.,¹ Быков В.И.,¹ Шепелевич В.В.²

*(¹Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск;*

*²Мозырский государственный педагогический университет
им. И.П. Шамякина, г. Мозырь)*

Аннотация

Рассмотрено применение методов голографической интерферометрии для выделения вкладов различного типа в фоторефрактивный отклик. Проведен анализ соотношений для относительных амплитуд первой и второй гармоник в информационном сигнале фазовой демодуляции, формирующемся при взаимодействии опорной и сигнальной волн в отражательной геометрии в образцах среза (111) и в пропускающей геометрии в образцах среза (110) кубических фоторефрактивных кристаллов. Показано, что выделение вклада флексоэлектрического эффекта возможно при встречном взаимодействии волн, имеющих циркулярные поляризации противоположных знаков в кристаллах симметрии 23 и одинаковую линейную поляризацию для кристаллов с симметрией $\bar{4}3m$, а также при попутном взаимодействии волн с одинаковой циркулярной поляризацией в кубических фоторефрактивных кристаллах среза (110).

Фазовая демодуляция информационного (сигнального) светового пучка в адаптивных голографических интерферометрах реализуется при его взаимодействии со стационарной опорной волной на формируемой в реверсивной среде динамической голограмме [1–5]. При использовании в качестве реверсивной среды фоторефрактивных кристаллов временной спектр интенсивности выходного сигнального пучка определяется как видом отклика, так и вкладом в него различных механизмов, приводящих к возмущениям оптических свойств среды формируемой в ней динамической голограммой (см., например, [1, 2, 4–7]). Это позволяет применять методы голографической интерферометрии для определения материальных параметров фоторефрактивных кристаллов. Характерным примером здесь является работа [8], в которой из зависимости сигнала фазовой демодуляции на второй гармонике модулирующего сигнала от ориентации вектора голографической решетки в плоскости (110) кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ были определены его фотоупругие постоянные p_{11} , $p_{12} + p_{13}$ и p_{44}^E . В настоящем сообщении рассмотрено применение принципов адаптивной голографической интерферометрии для выделения вкладов различного типа в фоторефрактивный отклик и для определения из них флексоэлектрических параметров кубических кристаллов классов симметрии 23 и $\bar{4}3m$.

Как известно [5, 9], взаимодействие сильной стационарной опорной волны со слабой фазово-модулированной гармоническим сигналом с частотой Ω сигнальной волной на фоторефрактивной голограмме приводит к эффекту фазовой демодуляции. Интенсивность такой сигнальной волны на выходной грани кристалла можно представить в виде разложения

$$I_S(t) \sim I_{S0} \left[M^{(0)} + M^{(1)} \sin \Omega t + M^{(2)} \cos 2\Omega t + \dots \right], \quad (1)$$

с относительными амплитудами гармоник $M^{(n)}$, зависящими от глубины фазовой модуляции φ_m , вида фоторефрактивного отклика и его параметров для рассматриваемого двухпучкового взаимодействия. В работах [6, 7] рассмотрено встречное взаимодействие волн, имеющих цирку-

лярные поляризации противоположных знаков, на отражательных голограммах в кристаллах класса силленитов среза (100). В этом случае удается выделить вклад во взаимодействие упругих деформаций, обусловленных обратным флексоэлектрическим эффектом, которые при диффузионном механизме формирования голограммы определяют глубину модуляции интенсивности на первой гармонике ($M^{(1)} \neq 0$). Используя такой же подход, мы получили следующие выражения для относительных амплитуд первой и второй гармоник в информационном сигнале, описывающие несколько видов двухпучкового взаимодействия:

$$M^{(1)}(\varphi_m) = 4J_0(\varphi_m)J_1(\varphi_m) \exp\left(\frac{\Gamma_E - \Gamma_a}{2}d\right) \sin\left(\frac{\Gamma_f}{2}d\right), \quad (2)$$

$$M^{(2)}(\varphi_m) = 4J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m) \left(\exp\left(\frac{\Gamma_E - \Gamma_a}{2}d\right) \cos\left(\frac{\Gamma_f}{2}d\right) - 1 \right), \quad (3)$$

где $J_n(\varphi_m)$ – функция Бесселя n -го порядка; d – толщина кристалла; Γ_E и Γ_a – коэффициенты связи, описывающие вклад во встречное взаимодействие фазовой и абсорбционной составляющих голограммы. Коэффициент связи Γ_f характеризует вклад в фоторефрактивный отклик, обусловленный обратным флексоэлектрическим эффектом, обеспечивающий, как следует из формулы (2), линейный режим фазовой демодуляции (при $M^{(1)} \neq 0$).

Соотношения (2) и (3) справедливы, во-первых, для описания встречного взаимодействия на отражательных голограммах в кубических фоторефрактивных кристаллах среза (111): для опорной и сигнальной волн, имеющих циркулярные поляризации противоположных знаков в кристаллах симметрии 23 (а); для волн с одинаковой линейной поляризацией в кристаллах симметрии $\bar{4}3m$ (б). В обоих случаях коэффициенты связи Γ_E и Γ_f определяются выражениями

$$\Gamma_E = -\frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \left[\frac{r_{41}^S}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}(p_{11} + p_{12} + p_{21} - 2p_{44}^E)e}{(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44}^E)} \right] E_{SC}, \quad (4)$$

$$\Gamma_f = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \frac{3(p_{11} + 2p_{12} - 2p_{44}^E)}{(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44}^E)} \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right) f_{[111]} E_{SC}, \quad (5)$$

где λ – длина волны света; n_0 – показатель преломления для невозмущенного кристалла; r_{41}^S – компонента электрооптического тензора механически зажато кристалла; p_{11} , p_{12} , p_{21} и p_{44}^E – упругооптические коэффициенты кристалла; E_{SC} – эффективное поле пространственного заряда голограммы [1, 6]; c_{11} , c_{12} и c_{44}^E – компоненты тензора модулей упругости кристалла в сокращенной форме записи; $e = 2e_{14}/3$ – эффективный пьезокоэффициент и e_{14} – пьезоэлектрическая константа кристалла. Вклад во взаимодействие обратного флексоэлектрического эффекта определяется эффективным коэффициентом $f_{[111]}$, который был найден нами в следующем виде:

$$f_{[111]} = \frac{1}{3\sqrt{3}} (f_{1111} + f_{1122} + f_{2211} + 2f_{2323} + 2f_{2332}), \quad (6)$$

где f_{ijkl} – компоненты флексоэлектрического тензора кристалла.

Во-вторых, соотношения (2) и (3) описывают попутное взаимодействие волн с одинаковой циркулярной поляризацией на голограммах пропускающего типа в кристаллах силлени-

тов среза (110). В этом случае коэффициенты связи Γ_E и Γ_f зависят от ориентации вектора фоторефрактивной решетки относительно кристаллографических осей и характеризуются сложной зависимостью от материальных параметров кристалла.

В экспериментах исследовалась фазовая демодуляция в кристаллах силленитов как в отражательной (для среза (111)), так и в пропускающей геометрии (для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (110)), с использованием известных схем [1, 2, 4-7]. Экспериментальное исследование зависимостей $M^{(1)}(\varphi_m)$ и $M^{(2)}(\varphi_m)$ определяемых соотношениями (2) и (3), проведенное для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca,Ga}$ с толщиной $d = 8,74$ мм на длине волны $\lambda = 633$ нм, позволило найти значения коэффициентов связи $|\Gamma_E| = 6,95 \text{ м}^{-1}$, $\Gamma_a = -4,35 \text{ м}^{-1}$ и $|\Gamma_f| = 1,4 \text{ м}^{-1}$. Используя далее формулы (4) и (5), мы оценили значение его эффективного флексоэлектрического коэффициента как $f_{[111]} = 2,6$ нКл/м.

Таким образом, для определения флексоэлектрических параметров кубических фоторефрактивных кристаллов методами голографической интерферометрии может быть использовано встречное взаимодействие волн, имеющих циркулярные поляризации противоположных знаков для кристаллов симметрии 23 и одинаковую линейную поляризацию для кристаллов симметрии $\bar{4}3m$, а также попутное взаимодействие волн с одинаковой циркулярной поляризацией в кристаллах силленитов среза (110).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 2.2.18 Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника») и БРФФИ (проект Ф15-154), а также Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2015 год и НИР по проектной части Госзадания № 3.878.2014/ИК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб.: Наука, 1992. – 320 с.
2. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 288 с.
3. Stepanov S., Cota F.P., Quintero A.N., Montero P.R. Population gratings in rare-earth doped fibers for adaptive detection of laser induced ultra-sound // Journal of Holography and Speckle. – 2009. – V. 5 (3). – P. 303–309.
4. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. – 2009. – V. 105 (3). – P. 031101.
5. Колегов А.А., Шандаров С.М., Симонова Г.В., Кабанова Л.А., Буримов Н.И., Шмаков С.С., Быков В.И., Каргин Ю.Ф. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. № 9. – С. 847–852.
6. Шандаров С.М., Шмаков С.С., Буримов Н.И., Сюваева О.С., Каргин Ю.Ф., Петров В.М. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 95. Вып. 12. – С. 699-702.
7. Шандаров С.М., Шмаков С.С., Зуев П.В., Буримов Н.И., Каргин Ю.Ф., Шепелевич В.В., Ропот П.И., Гуделев В.Г. Вклад обратного флексоэлектрического эффекта во встречное двухволновое взаимодействие световых пучков в фоторефрактивных кристаллах // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80. № 7. – С. 5–12.
8. Степанов С.И., Шандаров С.М., Хатьков Н.Д. Фотоупругий вклад в фоторефрактивный эффект в кубических кристаллах // ФТТ. – 1987. – Т. 29. № 10. – С. 3054–3058.

9. *Shandarov S.M., Kolegov A.A., Burimov N.I., Bykov V.I., Petrov V.M., Kargin Yu.F.* Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam // *Phys. Wave Phenomena.* – 2009. – V. 17, № 1. – P. 39–44.

APPLICATION OF ADAPTIVE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY TO EVALUATE THE PARAMETERS OF PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

Shandarov S.M.,¹ Burimov N.I.,¹ Bykov V.I.,¹ Shepelevich V.V.²

(¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk;

²I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus)

Abstrakt

We consider an application of adaptive holographic interferometry to the extraction of the contributions with different nature to the photorefractive response. An analysis of expressions for relative amplitudes of the first and second harmonics in an information signal of phase demodulation, which is formed at interaction between reference and signal waves both for reflection geometry in the (111)-cut cubic photorefractive crystals and for transmission geometry in the (110)-cut ones, is performed. It is shown that an extraction of the flexoelectric contribution is possible at contradirectional interaction of light waves both with circular polarizations of opposite signs in the crystals of symmetry 23 and with identical linear polarizations in the crystals of symmetry $\bar{4}3m$ as well as at codirectional interaction of light waves with identical circular polarizations in the (110)-cut cubic photorefractive crystals.

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАФИЯ МИКРООБЪЕКТОВ

Каленков Г.С.,¹ Каленков С.Г.,¹ Штанько А.Е.²

(¹Университет Машиностроения «МАМИ»,

²МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)

Аннотация

В серии наших работ [1-7] мы развили новый метод записи гиперспектральных голограмм в некогерентном свете. По сравнению с традиционными методами цифровой голографии, использующей когерентные источники света, гиперспектральная голография по нашему мнению обладает существенно большей информационной ёмкостью. Она позволяет в едином акте измерения регистрировать пространственно-спектральные характеристики объекта с высоким отношением сигнала к шуму. Это связано в первую очередь с тем что гиперспектральная голография основана на принципах Фурье-спектроскопии и наследует ее сильные стороны. Применение компьютеров в оптике (как известно, первое чрезвычайно успешное применение ЭВМ в оптике связано именно с Фурье-спектроскопией) позволило значительно расширить возможности современных оптических приборов и объем получаемой с их помощью информации. Например, в безлинзовой цифровой микроскопии компьютер непосредственно задействован в регистрации изображения (используются ПЗС камеры, передающие изображение в ЭВМ) и построении пространственного распределения фазовых и спектральных характеристик исследуемого объекта. Параметры же современных цифровых регистрирующих матриц таковы, что их можно с успехом применять для регистрации дифракционных картин микрообъектов.

Введение

Как хорошо известно [8], спектральный состав излучения, несущий информацию об оптических свойствах образца определяется численным Фурье-преобразованием интерферограммы, полученной на выходе интерферометра в процессе изменения длины одного из его плеч. Различают два типа интерферограмм: симметричные и несимметричные. Симметричная интерферограмма получается в том случае, когда исследуемый образец устанавливается в сведенных вместе пучках, после светоделителя. В этом случае преобразование Фурье интерферограммы дает информацию об энергетическом спектре излучения – модуле амплитуды спектральной плотности излучения прошедшего через образец. Несомненно, особый интерес представляет собой несимметричная интерферограмма. Несимметричная интерферограмма получается тогда, когда образец установлен в одном из плеч интерферометра (на месте неподвижного зеркала). В этом случае преобразование Фурье интерферограммы дает комплексную амплитуду спектра излучения, отраженного от образца, которая содержит полную информацию о спектральных свойствах образца, именно: зависимость комплексного показателя преломления образца от спектральной частоты $\sigma = 1/\lambda$, λ – длина волны. Формально оптическая схема регистрации несимметричной интерферограммы совпадает со схемой записи голограммы. Действительно, в обоих случаях имеются интерферирующие объектный и опорный световые пучки. Но в Фурье-спектрометре интерферограмма регистрируется точечным детектором, а в голографической схеме цифровая голограмма (или интерферограмма) регистрируется как двумерное поле интенсивности в некоторой плоскости с помощью цифровой камеры. Теперь, если вместо точечного приемника установить цифровую камеру, а в качестве образца взять микрообъект, то в результате дифракции объектный световой пучок будет освещать всю апертуру матрицы. Интерференция объектного светового пучка с опорным пучком позволяет в ходе движения опорного зеркала записать в каждом пикселе матрицы интерферограмму. Мы показали, что Фурье-преобразование от таких интерферограмм определяет комплексную амплитуду дифрагированного поля объекта для каждой спектральной частоты входящей в состав

излучения, то есть гиперспектральную голограмму. Здесь следует отметить следующее существенное обстоятельство: параметры современных цифровых матриц таковы, что их можно с успехом применять для регистрации дифракционных картин микрообъектов. Решая обратную задачу дифракции с помощью преобразования Фурье или Френеля, мы получаем комплексную функцию пропускания микрообъекта на произвольной спектральной частоте. Таким образом, Фурье спектрометр является не только спектральным прибором, т.е. прибором, способным с очень высоким разрешением определять спектры пропускания или поглощения образцов, но он, как оказывается, способен на гораздо большее: он может еще и записывать цифровые гиперспектральные голограммы микрообъектов в полихроматическом излучении. В настоящей работе мы приводим результаты новых теоретических и экспериментальных исследований по гиперспектральной Фурье-голографии микрообъектов. В частности, в этой работе мы исследовали возможность записи гиперспектральных голограмм для отражающих образцов и получили оценку глубины голографируемой сцены.

1. Модель

Пусть объект, установленный в одном плече интерферометра Майкельсона на месте неподвижного зеркала, освещается полихроматической волной, представляющей собой сумму плоских монохроматических волн:

$$u = \sum E(\sigma_m) \exp(2\pi i \sigma_m z) \Delta\sigma_m,$$

где $\sigma_m = \lambda_m^{-1}$ – волновое число или спектральная частота; λ_m – длина волны, $E(\sigma_m)$ – среднее значение спектральной плотности амплитуды волнового поля в спектральном интервале $\Delta\sigma_m$. Введем в рассмотрение функцию пропускания или отражения гиперспектрального транспаранта. Пусть функция $a(\sigma_m, \mathbf{x}) = |a(\sigma_m, \mathbf{x})| \exp[i\varphi(\sigma_m, \mathbf{x})]$ – комплексная функция пропускания или отражения объекта-транспаранта на некоторой определенной спектральной частоте σ_m , \mathbf{x} – двумерная координата объекта в плоскости $z = 0$. Рассмотрим одну спектральную компоненту плоской световой волны $E(\sigma_m) \exp(2\pi i \sigma_m z)$. Действие транспаранта на эту компоненту поля сводится к умножению на комплексную функцию пропускания $a(\sigma_m, \mathbf{x})$. Таким образом, волновое поле $u(\sigma_m, \mathbf{x})$ на выходе из объекта-транспаранта (непосредственно за транспарантом), будет:

$$u(\sigma_m, \mathbf{x}) = a(\sigma_m, \mathbf{x}) E(\sigma_m) \exp(2\pi i \sigma_m z) \Big|_{z=0} = a(\sigma_m, \mathbf{x}) E(\sigma_m).$$

Приведенные выше соображения можно обобщить на случай произвольного гиперспектрального объекта. Пусть $\Omega = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ – ширина спектрального окна функции пропускания (отражения) гиперспектрального объекта-транспаранта, т.е. спектральная область, в которой все функции $a(\sigma_m, \mathbf{x})$, $\sigma_m \in \Omega$ отличны от нуля. Разобьем область Ω на M равных частей, так что $\Delta\sigma_m = \Delta\sigma = \Omega / M$. Под гиперспектральным объектом будем понимать объект-транспарант, который воздействует на каждую монохроматическую компоненту $E(\sigma_m)$ адающего на него поля, так что на выходе из транспаранта волновое поле $u_\Omega(\mathbf{x})$ будет представлять собой сумму:

В общем случае, комплексное волновое поле объекта $a(\sigma_m, \mathbf{x})$ на спектральной частоте σ_m в плоскости \mathbf{x} связано с комплексной амплитудой дифракционного поля $A(\sigma_m, \xi)$, в плоскости регистрации ξ интегральным преобразованием $A(\sigma_m, \xi) = \Phi_{\sigma_m} \{a(\sigma_m, \mathbf{x})\}$, где ξ – двумерная координата в плоскости регистрации. Вид интегрального преобразования Φ_{σ_m} и, соответственно, дифракционного поля $A(\sigma_m, \xi)$, зависят от конкретной геометрии задачи: в частном

случае интегральный оператор Φ_{σ_m} может означать преобразование Фурье, как в нашей работе [4], а, в более общем случае, – преобразование Френеля:

$$A(\sigma_m, \xi) = \Phi_{\sigma_m} \{a(\sigma_m, \mathbf{x})\} = \int_d a(\sigma_m, \mathbf{x}) \exp \left[\pi i \sigma_m \frac{(\mathbf{x} - \xi)^2}{z} \right] d\mathbf{x}. \quad (2)$$

Положим, что размер объекта d и расстояние z от него до плоскости регистрации таковы, что выполняются условия Френелевской дифракции. Тогда комплексная амплитуда объектной волны $U(\sigma_m, \xi)$ на спектральной компоненте σ_m в плоскости матрицы есть $U(\sigma_m, \xi) = \exp(2\pi i \sigma_m z) E(\sigma_m) A(\sigma_m, \xi)$. Полная комплексная амплитуда полихроматического дифракционного поля $U_\Omega(\xi)$ в плоскости регистрации:

$$U_\Omega(\xi) = \Delta\sigma \sum_1^M U(\sigma_m, \xi) = \Delta\sigma \sum_1^M \exp(2\pi i \sigma_m z) E(\sigma_m) A(\sigma_m, \xi). \quad (3)$$

Интерferируют только спектральные компоненты с одинаковым волновым числом σ_m , поэтому спектральная плотность интенсивности интерференционного поля, связанная с объектной $U_G(\xi)$ и опорной волной $R(\delta) = \sum_1^M E(\sigma_m) \exp[2\pi i \sigma_m (z + \delta)]$, отраженной зеркала, смещенного на расстояние δ от положения нулевой разности хода, есть:

$$I(\sigma_m, \xi, \delta) = S(\sigma_m) \left| A(\sigma_m, \xi) + \exp[2\pi i \sigma_m \delta] \right|^2, \quad (4)$$

где $S(\sigma_m) = |E(\sigma_m)|^2$ – плотность мощности источника на спектральной частоте σ_m , которая предполагается известной. В каждом пикселе матрицы регистрируется, разумеется, величина полной интенсивности $G(\xi, \delta)$, т.е. сумма интенсивностей $I(\sigma_m, \xi, \delta)$ по всем спектральным частотам: $G(\xi, \delta) = \Delta\sigma \sum_1^M I(\sigma_m, \xi, \delta)$. В этой сумме представляет интерес только интерференционное слагаемое:

$$G_{\text{int}}(\xi, \delta) = \Delta\sigma \sum_1^M S(\sigma_m) \left[A(\sigma_m, \xi) \exp(-2\pi i \sigma_m \delta) + A^*(\sigma_m, \xi) \exp(2\pi i \sigma_m \delta) \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) для $G_{\text{int}}(\xi, \delta)$, как функция величины смещения зеркала δ , представляет собой пространственно-спектральную интерферограмму объекта, поскольку она зависит как от пространственных координат объектного поля ξ в плоскости матрицы, так и от спектральных свойств самого объекта, которые определяют вид гиперспектральных дифракционных полей. Выполняя Фурье-преобразование интерферограммы $G_{\text{int}}(\xi, \delta)$ по переменной δ и, учитывая, что для отрицательных спектральных частот $S(-\sigma) = 0$, получаем из (4) выражение для функции $A(\sigma_m, \xi)$:

$$A(\sigma_m, \xi) = \frac{\int G(\xi, \delta) \exp(2\pi i \sigma_m \delta) d\delta}{S(\sigma_m)}, \quad (5)$$

а с помощью обратного преобразования Φ_σ^{-1} функции $A(\sigma_m, \xi)$ можно получить голографическое изображение объекта для любой спектральной частоты σ_m . Величина смещения зеркала

ла δ ограничена длиной хода зеркала L , т.е. величиной интервала $-L \leq \delta \leq L$. Это обстоятельство накладывает естественное ограничение на пространственно-спектральное разрешение самой комплексной амплитуды дифракционного поля $A(\sigma_m, \xi)$. Очевидно, что две близкие компоненты поля $A(\sigma_m, \xi)$ и $A(\sigma_{m+1}, \xi)$ будут спектрально разрешимы в каждом пикселе матрицы и, соответственно, пространственно различимы при условии, если ход зеркала $L \geq \Delta\sigma^{-1} = (\sigma_{m+1} - \sigma_m)^{-1}$. При этом условии, выполняя обратное преобразование Френеля (2), мы сможем восстановить спектральные компоненты объекта a_m и a_{m+1} . При заданной длине хода зеркала L число спектрально разрешимых дифракционных полей и соответствующих им объектов равно $M = \Omega / \Delta\sigma = \Omega L$. Тогда, согласно формуле (5), при заданной длине сканирования зеркала L можно вычислить M пространственно-спектральных компонент $A_m = A(\sigma_m, \xi)$, $m = 1, 2, \dots, M$, по которым, затем, вычисляется набор из M комплексных функций $a_m = a(\sigma_m, \mathbf{x})$, $m = 1, 2, \dots, M$, представляющий собой совокупность восстановленных голографических изображений объекта. Согласно (1) сумма

$$u_\Omega(x) = \Delta\sigma \sum_1^M a(\sigma_m, \mathbf{x}) E(\sigma_m) = \frac{1}{L} \sum_1^M a(\sigma_m, \mathbf{x}) E(\sigma_m) \quad (6)$$

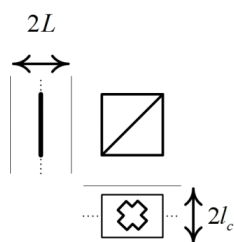
такого набора и представляет собой восстановленное волновое поле гиперспектрального объекта. Хорошо известно, что преимущество Фурье-спектрометра и его высокая разрешающая способность по сравнению с дифракционными приборами фактически вытекают из двух основных составляющих, известных как выигрыш Жакино и мультиплекс-фактор Фелжета. В нашем случае выигрыш в мультиплексности обусловлен тем, что в течение всего времени экспозиции или регистрации интерферограммы $G_{\text{int}}(\xi, \delta)$ матрица Фурье-спектрометра регистрирует одновременно все спектральные компоненты объекта $A_m = A(\sigma_m, \xi)$. Число таких компонент M равно мультиплекс фактору. Из этого следует, что по сравнению с регистрацией гиперспектральных голограмм, например, с помощью перестраиваемого лазера, в данном случае получаем значительный выигрыш в значении отношения сигнала к шуму. Как известно из теории Фурье-спектроскопии, этот выигрыш пропорционален величине \sqrt{M} . В наших экспериментах, которые описаны ниже, значение величины $M \sim 500$, поэтому величина отношения сигнала к шуму, по сравнению с методом регистрации гиперспектральных голограмм с помощью перестраиваемого лазера в двадцать раз выше. Еще одно из важных преимуществ Фурье-спектроскопии, связанное с повышением величины отношения сигнал-шум, а значит, и повышением разрешающей способности является многократное сканирование. Многократное сканирование приводит к усреднению шума при регистрации всех спектральных компонент $A_m = A(\sigma_m, \xi)$ и понижению его среднего уровня, что, очевидно, увеличивает пространственно-спектральное разрешение восстановленных голографических изображений микрообъектов. Обратимся теперь к процедуре восстановления гиперспектральных голографических изображений, основанной на формуле (5). В нашей работе [4], мы показали, что изображение объекта численно восстанавливается, если величина z определена достаточно точно. При этом, глубина фокуса Δz

$$\Delta z \leq \frac{\lambda z^2}{D^2} = \lambda / \theta_0^2, \quad (11)$$

где D – размер матрицы и $\theta_0 = D / z$, что совпадает с известным выражением для глубины резкости Δz объектива с числовой апертурой $\theta_0 = D / z$. Здесь: D – размер апертуры объектива

с фокусным расстоянием $f = z$. Как видно из рисунка оптические схемы записи гиперспектральных голограмм прозрачных и отражающих объектов имеют свои особенности.

Если продольный размер прозрачного объекта-транспаранта меньше или порядка характерного значения глубины резкости Δz , то надлежащим подбором расстояния от объекта до плоскости регистрации, (т.е. величины z) восстанавливается гиперспектральное голографическое изображение целого объекта. В противном случае, очевидно, для восстановления прозрачного объекта необходимо взять серию значений z , выполнить несколько шагов по z , так чтобы восстановить всю глубину сцены, занимаемой прозрачным объектом. Для отражающего объекта ситуация несколько иная.



Как мы уже отмечали, интерферируют только волновые поля, имеющие одинаковые или, точнее говоря, близкие волновые числа σ . Таким образом, компоненты $A(\sigma, \xi)$ квазимонохроматического дифракционного поля объекта из спектрального интервала $\sigma \in \Delta\sigma$ интерферируют с опорными полями $R_n(\sigma) = \exp[2\pi i\sigma(z + \delta n)]$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$, $\delta N = L$ из той же спектральной группы $\Delta\sigma$ (Здесь σ – средняя спектральная частота.) Понятно, что такая интерференция будет при условии, если

разность хода между ними не превосходит длину порядка длины когерентности $l_c = \Delta\sigma^{-1} = \lambda^2 / \Delta\lambda$. На рисунке схематично изображен объект, делитель и подвижное зеркало. Пунктирная линия – положение нулевой разности хода, относительно которой подвижное зеркало перемещается на длину L . Объект находится в слое $2l_c$. Поскольку $L\Delta\sigma = L/l_c \sim 1$ и $l_c \sim L$, то, как ясно из рисунка, максимальная разность хода между объектным полем и опорной волной, отраженной от подвижного зеркала порядка $2L$. Это означает, что глубина голографируемой сцены отражающего объекта определяется просто ходом зеркала от положения нулевой разности хода и равна по порядку величины $2L$. Если необходимо прописать большую глубину сцены, то нам необходимо двигаться шагами: переместить столик в новое положение и сканировать зеркалом относительно нового положения нулевой разности хода, пока такими шагами мы не перекроем всю сцену, занимаемую объектом. Безусловно, на каждом шаге необходимо сфокусироваться, чтобы получить четкие фрагменты объекта внутри сцены на каждом шаге. Таким образом, отличие оптической схемы записи на пропускание от схемы на отражение состоит в том, что в первом случае разность хода между объектной волной и опорной определяется только ходом подвижного зеркала и не зависит от положения объекта. Во втором случае (схема на отражения) разность хода зависит и от хода зеркала и от положения объекта, поэтому вся сцена должна записываться, как было описано выше, шагами путем перемещения подвижного столика.

2. Эксперимент

На рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема макета голографического Фурье-спектрометра. В качестве полихроматического источника излучения I использовался волоконный лазер суперконтинуума мощностью 200 мВт, генерирующий излучение в диапазоне длин волн от 0,45 мкм до 2 мкм. Излучение источника I делится кубиком 2 и затем призмой 3 , направляется на объект 4 и матрицу 8 . Опорная волна призмой 6 (или зеркалом 9), установленной на пьезо-столике 7 , направляется на матрицу через кубик 5 . Пошаговое перемещение столика синхронизовано с регистрацией интерферограмм на матрице 8 . Величина шага $\delta = 0,1$ мкм, длина хода $L = 100$ мкм. Скорость регистрации ~ 50 кадров в секунду, общее количество интерферограмм – 1000 за одно сканирование, формат кадра CMOS сенсора – 2048x2560 пикселей, 12 бит на пиксель. В соответствии с (5), мы вычислили набор голограмм дифракционного

поля микрообъекта, для чего для каждого пикселя в массиве интерферограмм вычислялось одномерное преобразование Фурье по переменной δ . Обратным преобразованием Френеля определялась комплексная амплитуда поля объекта $a(\sigma, \mathbf{x})$. Пространственное распределение интенсивности квадрата модуля комплексной амплитуды поля объекта $|a(\sigma, \mathbf{x})|^2$ представляет собой амплитудное изображение микрообъекта, а $\arctg[\text{Im}a(\sigma, \mathbf{x})/\text{Re}a(\sigma, \mathbf{x})]$ – его фазовое изображение на выбранной спектральной частоте σ . Амплитудные и фазовые изображения на выбранной спектральной частоте σ будем далее называть монохроматическими. В соответствии с (6), сумма монохроматических изображений представляет собой гиперспектральное изображение объекта.

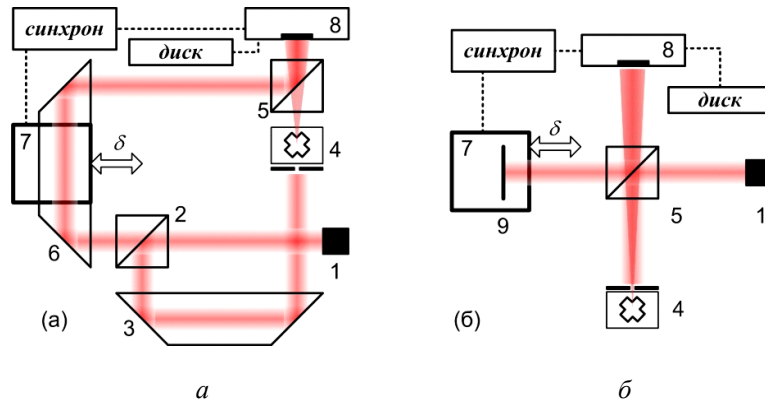


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема голографического Фурье-спектрометра в схеме на просвет (а) и на отражение (б)

Важно отметить, что полученное таким образом гиперспектральное изображение обладает свойством точной, физической цветопередачи. Это подтверждено проведенными нами экспериментами. Рис. 5 иллюстрирует процесс синтеза цветного изображения. Объектом служил срез стебля лотоса, освещенный через матовое стекло.

На спектральный диапазон от 0,45 до 0,7 мкм приходится 145 пространственно-спектральных компонент A_m , для каждой из которых мы получили монохроматическое изображение $|a_m|^2$ в градациях серого. Затем каждое монохроматическое изображение было «окрашено» в свой цвет в соответствии с колориметрическим стандартом цветового пространства и световосприятия CIE 1931. На рис. 2, а-д представлены окрашенные монохроматические изображения для некоторых длин волн. Сумма всех 145 окрашенных монохроматических изображений дает окрашенное гиперспектральное изображение микрообъекта (рис. 2, е). Для сравнения на рисю 2, ж, з приведены центральные области изображения объекта, полученные на обычном микроскопе с увеличением порядка 100 крат и на нашей установке соответственно. Видно хорошее соответствие цвета синтезированного изображения и оригинала.

Суммирование монохроматических изображений приводит также к эффекту подавления спекл-шума, который присутствует в каждом из монохроматических изображений, если объект обладает свойством диффузного рассеяния света. Случайная модуляция фазы волны в рассеивающей среде зависит не только от неоднородностей среды, но и от длины волны излучения. Поэтому на монохроматических изображениях для разных длин волн возникают разные реализации спекл-структуры, что и обуславливает возможность ее усреднения в процессе суммирования монохроматических изображений. Эффект подавления спекл-шума продемонстрирован в эксперименте с освещением объекта (голова муравья) через матовое стекло, установленное под диафрагмирующую объект 4 маску, размером 1 мм (рис. 1, а). На рис. 3, а приведено монохроматическое изображение муравья для длины волны 0,5 мкм, на котором отчетливо вид-

на обусловленная диффузным рассеянием спекл-структура, затрудняющая наблюдение мелких деталей. Как и в предыдущем эксперименте, мы получили 145 монохроматических изображений и синтезировали гиперспектральное изображение (рис. 3, б), на котором контраст спекл-структуры существенно снижен. Можно отметить, что в отличие от ряда предложенных способов уменьшения спекл-шума, данный метод не приводит к снижению пространственного разрешения.

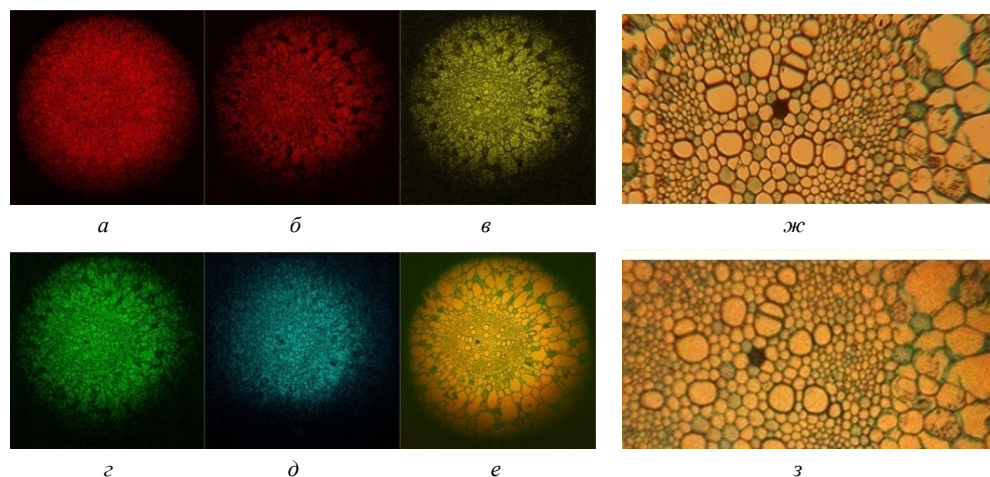


Рис.2. Синтезирование цветного изображения; (а-д) – монохромные изображения, (е) – суммарное цветное изображение, (з) – его фрагмент, (ж) – тот же фрагмент, наблюдаемый в оптический микроскоп

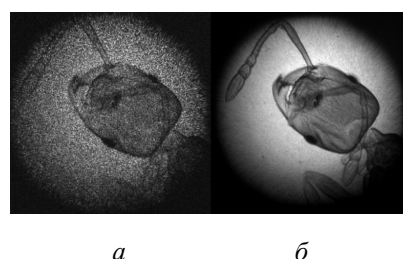


Рис. 3. Изображение, восстановленное для одной спектральной компоненты (а) и для суммы 145 спектральных компонент (б)

Предложенный нами метод гиперспектральной голографической Фурье-микроскопии позволяет фокусироваться на разные плоскости трехмерного объекта. Выражения (11) определяет глубину резкости и точность фокусировки.

Такая возможность проиллюстрирована нами в эксперименте по записи двухслойного объекта, представляющего собой две наложенные одна на другую стандартные окулярные шкалы, освещаемые через матовое стекло. Продольное расстояние между шкалами составляло 2 мм. Гиперспектральные изображения обеих шкал, вычисленные при двух разных параметрах фокусировки z , приведены на рис. 4. Можно видеть отсутствие взаимного наложения изображений.

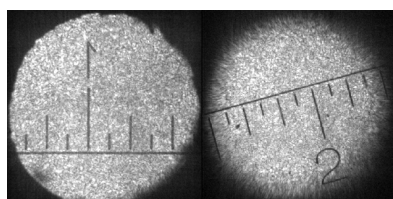


Рис. 4. Цифровая фокусировка на разные плоскости двух окулярных шкал

Гиперспектральная голографическая Фурье-микроскопия позволяет вычислить фазу волнового поля объекта $\varphi(\sigma, x) = \arctg[\text{Im } a(\sigma, x)/\text{Re } a(\sigma, x)]$ для любой спектральной частоты. Эта

функция содержит информацию об оптической толщине (оптическом профиле) объекта и во многих случаях более информативна, чем обычное амплитудное изображение. Возможность восстановления полихроматического волнового поля позволяет реализовать новый способ представления информации об оптической толщине объекта – в виде интегрального оптического профиля. Речь идет о сложении фазовых изображений, полученных для разных спектральных компонент. Однако, прямое их суммирование некорректно, поскольку фазовый набег $\varphi = 2\pi\sigma n\Delta z$ зависит от спектральной частоты σ , толщины объекта Δz и показателя преломления n . Если пренебречь дисперсией света, то независимой от длины волны величиной можно считать оптическую толщину объекта $n\Delta z = \varphi / 2\pi\sigma$, которую назовем оптическим профилем объекта. Усредняя оптические профили всех спектральных компонент получим интегральный оптический профиль, в котором шумы, характерные для отдельных компонент, будут сглаженными. Пример построенного таким образом интегрального профиля среза земляного червя показан на рис. 5.

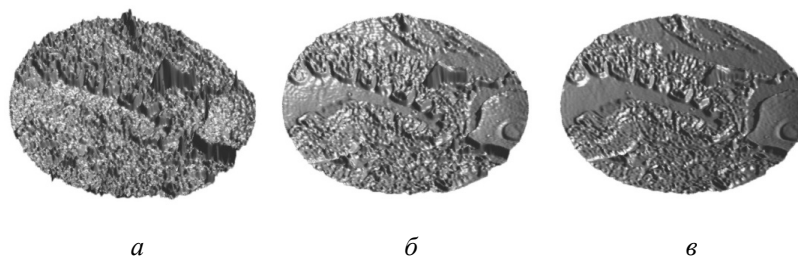


Рис. 5. Изображение оптического профиля среза земляного червя, построенное для одной спектральной компоненты (а), а также интегральный профиль для 25 спектральных компонент (б) и для 50 спектральных компонент (в)

Изображение оптического профиля для одной спектральной компоненты (рис. 6, а) похоже на фазовое изображение, полученное методом цифровой голографической микроскопии в когерентном излучении тем, что содержит характерный для рассеивающего объекта когерентный спекл-шум. На рис. 6, б и в отчетливо видно улучшение качества изображения оптического профиля объекта по мере увеличения числа задействованных в расчетах спектральных компонент.

Мы экспериментально подтвердили возможность записи гиперспектральных голограмм диффузно отражающих объектов.

Объектом служила головка микрометрического винта, установленная под небольшим углом к оптической оси предметного плеча. Запись всей глубины сцены проводили в несколько шагов, последовательно смещая положение нулевой разности хода на 100 мкм. Изображение всей сцены, представленной на рис. 6, является синтезом отдельных фрагментов. С помощью описанной процедуры был записан цветной объект – полиграфическое изображение цветовой палитры на бумаге, зажатой между двумя предметными стеклами (рис. 7). Небольшой угол между плоскостью объекта и освещающим пучком определяет глубину сцены.

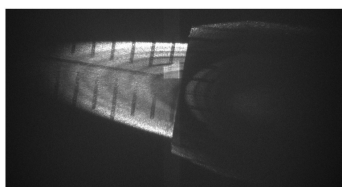


Рис. 6. Итоговое изображение головки микрометрического винта – сцена, глубиной 1 мм, построена по 10 фрагментам, глубиной 100 мкм каждый

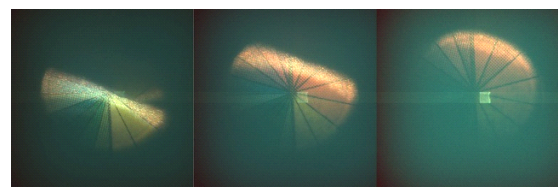


Рис. 7. Три изображения цветовой палитры, записанные при разном положении нулевой разности хода

Заключение

В основе предложенного нами метода гиперспектральной голографической Фурье-микроскопии лежит возможность записи гиперспектральных голограмм в некогерентном излучении. Это открывает, по нашему мнению, актуальные и практически важные применения данного метода в исследовании объектов, например, в терагерцовом или рентгеновском диапазонах. В этих диапазонах отсутствуют достаточно дешевые и доступные источники когерентного излучения. Вместе с тем, современный прогресс средств регистрации излучения дает основание надеяться, что предложенный нами метод окажется перспективным для получения гиперспектральных голограмм и в этих спектральных диапазонах. Поскольку в основе метода лежат принципы и техника Фурье-спектроскопии, то он естественным образом наследует все сильные стороны этих принципов: беспрецедентно высокое отношение сигнала к шуму и, как следствие, высокое пространственно – спектральное разрешение голографического изображения, по сравнению, например, с гиперспектральными голограммами, получаемыми с помощью перестраиваемого по частоте лазера. Наконец, отметим наиболее существенное преимущество метода гиперспектральной Фурье – голографии: метод позволяет в едином процессе регистрации зафиксировать амплитуду, фазу и частоту поля, что дает действительные основания называть его *holography*, то есть «полной записью».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каленков С.Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е. «Фурье-спектрометр как система голографического изображения микрообъектов в низкокогерентном свете». Измерительная техника 11, (2012), с. 21-25.
2. Каленков С.Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е. «Пространственно-спектральная цифровая голография микрообъектов в низкокогерентном свете». Радиотехника и электроника, 58, №12, (2013), с. 1-6.
3. Каленков С.Г., Локшин Г.Р. «Модуляционная микроскопия и запись голограммы в немонохроматическом свете». Радиотехника и электроника 58, 3, (2013), с. 247-250.
4. Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. «Spectrally-spatial fourier-holography». Optics Express, 21, No. 21, (2013), 24985-24990.
5. Kalenkov G.S., Kalenkov S., and Shtanko A. «Hyperspectral Holographic Fourier-Microscopy», in Imaging and Applied Optics 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper DTh3B.
6. Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. «Hyperspectral digital holography of microobjects». Proc. SPIE 9386, Practical Holography XXIX: Materials and Applications, 938604 (March 10, 2015); doi:10.1117/12.2085259.
7. Каленков Г.С., Каленков С.Г., Штанько А.Е. «Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия». Квант. электроника, 2015, 45 (4), 333–338.
8. Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию, М., «Мир» (1975).

HYPERSPECTRAL FOURIER HOLOGRAPHY OF MICROOBJECTS

Kalenkov S.G.,¹ Kalenkov G.S.,¹ Shtanko A.E.²

(¹ Moscow state university of mechanical engineering (MAMI);

² MSTU «STANKIN», Moscow)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАММ В $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ОТ ТОЛЩИНЫ ОБРАЗЦОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Макаревич А.В.,¹ Шепелевич В.В.,¹ Ропот П.И.,² Шандаров С.М.³

(¹ Мозырский государственный педагогический
университет им. И.П. Шамякина, г. Мозырь;

² Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск;

³ Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск)

Аннотация

Экспериментально установлена зависимость дифракционной эффективности голограмм от толщины и ориентационного угла кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ с использованием одного кристаллического образца с фиксированной толщиной 8 мм. Проведена теоретическая интерпретация экспериментальных данных с учетом электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов, а также оптической активности кристалла. Полученные результаты могут быть использованы для рационального выбора толщины кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ при его применении в голографической интерферометрии. Разработанная методика эксперимента может быть применена в аналогичных исследованиях других объемных голографических сред.

В связи с возможностью практического применения фоторефрактивных кристаллов в голографической интерферометрии (см., напр., [1–3]) представляет интерес эмпирически обоснованный выбор толщины кристалла, при которой возможно достижение максимальных значений дифракционной эффективности записанных голограмм.

Из научной литературы, посвященной тематике теоретических и экспериментальных исследований таких кристаллов (см., например, [4–6]), известен широкий спектр подходов для изучения выходных характеристик сформированных объемных голографических решеток. Однако, насколько нам известно, на сегодняшний день слабо изученным остается вопрос об экспериментальном исследовании зависимости дифракционной эффективности голограмм от толщины фоторефрактивных кристаллов. Это может быть связано с традиционным предположением, что для проведения такого эксперимента необходимо иметь набор образцов кристаллов различных толщин с одинаковыми фоторефрактивными свойствами, то есть вырезанных из одного монокристалла, который не всегда доступен. В данной работе на примере кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ с фиксированной толщиной 8 мм показана возможность проведения вышеуказанного исследования с использованием только одного образца кристалла.

В [7–9] была предложена трапециевидная геометрии перекрытия в кристалле световых пучков, которая не требовала для установления экспериментальной толщинной зависимости коэффициента усиления при двухволновом взаимодействии в фоторефрактивных кристаллах со структурой силленита ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) наличия набора образцов различной толщины. При этом использовались две фиксированные взаимно ортогональные ориентации вектора голографической решетки \vec{K} в кристалле, для которых вклад в фоторефрактивный отклик обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов (см., напр., [5–6]) либо отсутствует ($\vec{K} \parallel [001]$), либо им можно пренебречь ($\vec{K} \perp [001]$). Это позволяло при физическом истолковании полученных экспериментальных зависимостей ограничиваться анализом вклада в двухволновое взаимодействие только электрооптического эффекта и оптической активности кристалла.

В отличие от [7–9], в нашем исследовании изучалась зависимость дифракционной эффективности голограммы одновременно от толщины кристалла и от ориентации вектора голографической решетки в плоскости среза ($\bar{1}\bar{1}0$), которая характеризовалась ориентационным углом θ . Кроме того, при интерпретации полученной экспериментальной зависимости использовался вклад в фоторефрактивный отклик электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов одновременно.

Для проведения экспериментов с применением трапециевидной геометрии [7–9] перекрытия световых пучков был выбран образец кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза ($\bar{1}\bar{1}0$) с фиксированной толщиной 8 мм.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований зависимости дифракционной эффективности голограмм η от ориентационного угла θ и толщины d кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза ($\bar{1}\bar{1}0$) для двух азимутов линейной поляризации считывающего пучка $\Psi_0 = 0$ и 90° , представлены на рис. 1.

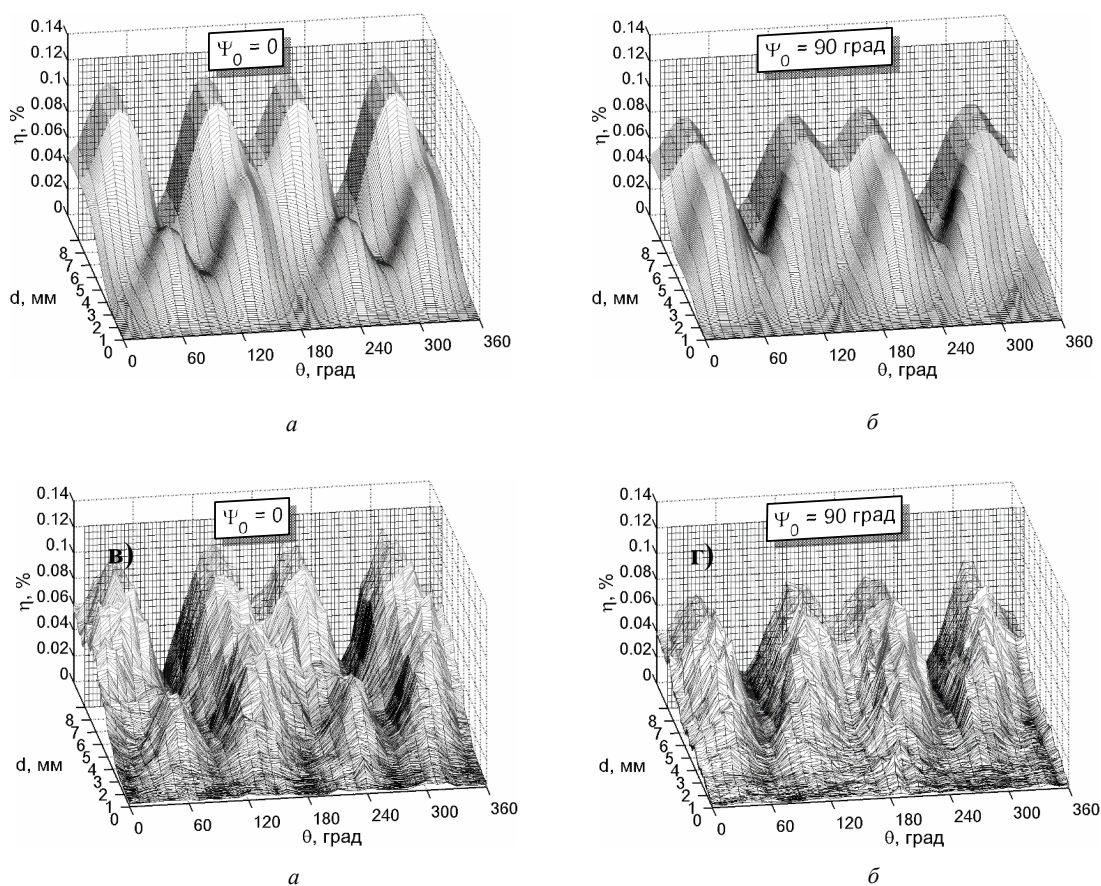


Рис. 1. Зависимости дифракционной эффективности голограмм $\eta(\theta, d)$, записанных в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза ($\bar{1}\bar{1}0$) с фиксированной толщиной $d_0 = 8$ мм от ориентационного угла θ и толщины кристалла d : $a, б$ – теоретические зависимости $\eta(\theta, d)$ при $\Psi_0 = 0$ и $\Psi_0 = 90^\circ$ соответственно; $в, г$ – экспериментальные зависимости $\eta(\theta, d)$ при $\Psi_0 = 0$ и $\Psi_0 = 90^\circ$ соответственно

Во всех случаях плоскостью $d = 8$ мм отмечена «граница» между двумя областями графической зависимости: областью, в которой дифракция опорного пучка R происходила при различных толщинах кристалла, принадлежащих интервалу от 0 до 8 мм, и областью, в которой дифрагированный пучок распространялся в отсутствие голографической решетки, сохраняя свои характеристики при толщине кристалла 8 мм.

При расчетах использованы параметры кристалла из [6, 10], а также его пространственная ориентация относительно плоскости падения световых пучков, связанной с рабочей системой координат, и направление отсчета ориентационного угла θ из [6]. Амплитуда напряженности электрического поля пространственного заряда E_{sc} выбиралась равной $37,9 \times 10^3$ В/м. Также при проведении экспериментов угол Брэгга φ_0 вне кристалла составлял 28° , а отношения интенсивностей предметного S к опорному R световых пучков до вхождения в кристалл были равны 0,047 и 0,058 для соответствующих азимутов линейной поляризации $\Psi_0 = 0$ и $\Psi_0 = 90^\circ$.

Из рис. 1, а, б видно, что полученные теоретические зависимости $\eta(\theta, d)$, одновременно учитывающие влияние на дифракционную эффективность голограмм в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов, а также оптической активности кристалла, имеют хорошее согласование с полученными экспериментальными результатами, которые иллюстрируются рис. 1, в, г. Следует отметить, что в случае пренебрежения вкладом обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов теоретические зависимости $\eta(\theta, d)$ имеют качественное и количественное различие с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, на примере кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ с фиксированной толщиной 8 мм показана возможность экспериментального исследования толщины зависимости дифракционной эффективности голограмм. При проведенном исследовании выявлено существенное влияние обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов на выходные характеристики голограмм в этом кристалле. Полученные экспериментальные данные могут позволить эффективно использовать этот кристалл в голографической интерферометрии и показывают возможность аналогичного исследования других объемных голографических регистрирующих материалов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 2.2.18 Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника») и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф15-154), а также Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2015 год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука. С.-Петербургское отд-ние, 1992. – 320 с.
2. Gesualdi, M.R.R. Advances in phase-stepping real-time holography using photorefractive sillenite crystals / M.R.R. Gesualdi, E.A. Barbosa, M. Muramatsu // JOAM. – 2006. – Vol. 8, № 4. – P. 1574–1583.
3. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю.Н. Кульчин [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 283 с.
4. *Solytar L.* The physics and applications of photorefractive materials / L. Solytar, D.J. Webb, A. Grunnet–Jepsen. – Oxford: Clarendon Press, 1996. – 494 p.
5. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах: монография / С.М. Шандаров [и др.]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 242 с.
6. Шепелевич, В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах: монография / В.В. Шепелевич. – Минск: Изд. центр БГУ, 2012. – 254 с.
7. Dynamic holography with none plane waves in sillenites / E. Shamonina [et al.] // Opt. Quant. Electron. – 1996. – Vol. 28. – P. 25–42.
8. Investigation of two-wave mixing in arbitrary oriented sillenite crystals / E. Shamonina [et al.] // Appl. Phys. B. – 1997. – Vol. 64. – P. 49–56.
9. Optical activity in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ / E. Shamonina [et al.] // Opt. Comm. – 1998. – Vol. 146. – P. 62–68.

10. Акустические кристаллы / А.А. Блисталов [и др.]; под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.

THE EXPERIMENTAL DEPENDENCE OF THE HOLOGRAM DIFFRACTION EFFICIENCY IN $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ON THE THICKNESS OF SAMPLE USED IN INTERFEROMETRY

Makarevich A.V.,¹ Shepelevich V.V.,¹ Ropot P.I.,² Shandarov S.M.³

(¹ I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus;

*² B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;*

³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk)

Abstrakt

The dependence of the hologram diffraction efficiency on the thickness and orientation angle of the $(\bar{1}\bar{1}0)$ -cut $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal with using the single crystal sample with the fixed thickness of 8 mm is experimentally established. The theoretical interpretation of the experimental data with taking into account the electro-optical, photoelastic and inverse piezoelectric effects, as well as the crystal optical activity is carried out. Obtained results can be used for rational selecting the thickness of the $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal when it is used in the holographic interferometry. The developed experimental technique could be applied in similar studies of other volume holographic media.

ЛАЗЕРНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ БОЛЬШИХ ОТСТУПЛЕНИЙ ВОЛНОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ

Лукин А.В.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

Голографическая интерферометрия при наличии образцового оптического элемента существенно упрощает процесс измерения величины и характера отклонений контролируемых оптических деталей от данного образца (эталоны). Синтезированные голограммы (СГ), способные выполнять функции как образцовых оптических элементов, так и оптических компенсаторов, еще более расширяют ее практические возможности [1]. Однако на начальных стадиях формообразования оптических поверхностей, в особенности, крупногабаритных и асферических, как правило, приходится иметь дело со значительными отступлениями рабочих поверхностей изготавливаемых оптических элементов от заданной формы, что существенно усложняет получение количественных данных для оперативного управления доводочными технологическими операциями.

Рассматриваются возможные подходы к снижению остроты этой проблемы:

- применение в интерферометрах длинноволновых лазерных источников излучения (ИК-интерферометрия) [2];

- двухдлинноволновая голографическая интерферометрия («оконтуривание» рельефа). Эффективная длина волны может изменяться в широких пределах (от долей микрометра до нескольких десятков микрометров) [3,4];

- сдвиговая радиальная интерферометрия на основе использования осевых синтезированных голограмм, осуществляющих одновременно функции оптического компенсирования, светоделения и радиального сдвига волновых фронтов [5];

- применение в интерферометрах в качестве источников света полупроводниковых лазеров в режиме, преимущественно, двухчастотной генерации. Используя лазеры с различными длинами резонатора и разными длинами волн генерации, можно варьировать цену эквивалентной полосы муара в широких пределах [6].

В докладе приводятся примеры практической реализации этих технических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйнов Г.Н., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Голографический интерференционный контроль асферических поверхностей // ОМП. 1971. № 4. С. 6-11.
2. Дучицкий А.С., Лукин А.В., Маврин С.В., Мельников А.Н. Лазерно-голографический комплекс для технологического и аттестационного контроля оптических элементов и объективов в инфракрасном диапазоне спектра 3-12 мкм // «Прикладная физика» 2008. № 3. С. 125-127.
3. Wyant J.C. Testing Aspherics Using Two-Wavelength Holography // Appl. Opt. 1971. 10. С. 2113-2118.
4. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Садыкова А.И. Применение двухдлинноволновой голографической интерферометрии для контроля асферических поверхностей Сборник «Проблемы голографии». Вып. 1М.: РТУС, 1973. С. 76-78.
5. Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Получение интерферограмм радиального сдвига методом голографии // Оптика и спектроскопия. 1975. Т. 39. Вып. 2. С. 350-355.
6. Лукин А.В. К вопросу о когерентных свойствах лазерных источников в интерферометрии и голографии // Оптический журнал. 2012. № 3. С. 91-96.

LASER AND HOLOGRAPHIC METHODS USED TO CONTROL SUBSTANTIAL DEFLECTIONS OF WAVE SURFACES FROM THE SPECIFIED SHAPE

Lukin A.V.

*(OJSC «Scientific and Production Association
«State Institute of Applied Optics», Kazan)*

The paper deals with controlling optical surfaces, mainly large-sized and aspherical ones, at initial stages of their shape formation, when deflections of the produced surfaces from the specified shape are, as a rule, rather substantial. It describes some ways of solving this acute problem by means of axial computer-generated holograms:

- IR-interferometry;
- dual-long-wavelength holographic interferometry (a «contouring» method);
- radial shearing interferometry using axial computer-generated holograms;
- interferometry using semiconductor laser light sources, which operate, mainly, in the two-frequency mode.

The paper shows that interferometric control of aspherical surfaces is feasible even in cases when deflections of the produced surface from the specified shape at the initial stage of its shape formation are some millimeters.

It presents some results of experimental investigations of the examined engineering solutions.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

POSTER PRESENTATIONS

СЕКЦИЯ 1 | SECTION 1

МЕХАНИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ РЕКОМБИНАЦИИ

Горчарук А.И., Моисеенко П.В., Танин Л.В., Бобореко А.Г.

(ЗАО «Голографическая индустрия», г. Минск)

Развитие технологий создания защитных оптических элементов, требования к которым всё более ужесточаются идёт по нескольким направлениям. Прежде всего, это комбинированные технологии с использованием дополнительных физических эффектов, например таких как поляризация, или применением линзовых растров. Это приводит к использованию дополнительных слоёв при производстве защитных оптических элементов и, как следствие, происходит удорожание производственного процесса тиражирования.

Альтернативой служит создание и использование новых визуальных эффектов на основе радужной голографии или цифровой голографии. Может сложиться впечатление, что все возможные визуальные эффекты уже освоены и широко используются производителями. Однако, существуют ещё возможности создания защитных оптических голограмм на основе комбинирования цифровых и аналоговых методов без удорожания процесса производства на стадии тиражирования, так как не происходит использование дополнительных слоёв голографической фольги, а весь визуальный эффект производится на стадии создания исходного рельефа.

В данном докладе представлен способ внедрения в голограмму дифракционных защитных элементов на этапе рекомбинации, выполненных цифровыми, аналоговыми и механическими методами в связи с невозможностью реализации по включению данных элементов на этапе записи.

В настоящее время наиболее распространены три технологии записи голограмм: оптическая (аналоговая) запись изображения, dot-matrix технология, e-beam технология.

Аналоговая технология – это классическая технология записи изображения, для которой необходимо относительно недорогое оптическое оборудование (лазер, оптический стол, расходные материалы и т.д.). Достоинством его является относительная простота, сравнительно невысокая цена оборудования и, как следствие, невысокая себестоимость изделия. Однако, по тем же причинам, оптически записанные голограммы наиболее подвержены подделкам.

Dot-matrix технология. Дорогая технология, для которой требуется специальное и достаточно сложное, оборудование, программное обеспечение. Технология Dot-matrix базируется на аналоговой записи микроэлемента изображения (пикселя). Такой метод записи является одновременно и аналоговым, и цифровым.

E-beam технология предполагает использование электронно-лучевого литографа. Оборудование и программное обеспечение для записи изображения крайне дорогое и сложное. Позволяет вносить в изображение различные степени защищенности от подделки (микротек-

сты высотой от 10 мкм, микрооптические элементы, «скрытые» изображения и т.д.). Необходимость использования такой технологии появляется только в случаях, когда требуется чрезвычайно высокое разрешение элементов голограммы и специальных защитных элементов.

Комбинированная технология сочетает в себе одновременно различные методы записи. Является наиболее сложной и дорогостоящей. Практически нет возможности для имитации в обычных условиях оптической лаборатории. В настоящий момент при записи комбинированной голограммы совмещают аналоговую и dot-matrix технологии. Область спектральной чувствительности фоторезиста для электронно-лучевой записи голограмм отличается от области спектральной чувствительности фоторезиста для лазерной аналоговой и цифровой записей. В связи с этим комбинирование данных технологий на стадии изготовления оригинала голограммы крайне затруднительно.

Специалистами ЗАО «Голографическая индустрия» разработан метод внедрения в голограмму защитных элементов, изготовленных различными оптическими и механическими методами на этапе рекомбинации голограммы.

На этапе изготовления оригинала мы имеем стеклянную пластинку с фоторезистом, на котором существует микрорельеф голограммы. После металлизации и выращивания гальванической копии мы получаем первичную мастер-матрицу с которой в свою очередь выращивается первичная рабочая матрица для изготовления мультипликации. Процедура мультипликации позволяет получить на пластиковой пластине множество нанесённых на неё копий оригинальной голограммы. После металлизации и гальваники получается мастер-матрица и рабочая матрица большого размера, которая позволяет непосредственно осуществлять массовое тиражирование голограмм.

После того как были сформированы возможные защитные элементы на этапе записи голограммы, внесение дополнительных защитных признаков осуществляется на первичной рабочей матрице. Для этого на матрице происходит высечка той области, которая должна содержать защитный элемент. Высечка выполняется при помощи стальных штампов с заданным контуром, которые устанавливаются в специальном вырубном прессе. При этом качество краёв вдоль вырубленного контура матрицы получается высокого качества. Затем изготавливается ещё одна матрица, содержащая защитный элемент, который мы хотим совместить с основной голограммой. После этого происходит наложение матрицы с прорубленным отверстием на матрицу содержащую защитный элемент и совмещают данный элемент с отверстием. Затем происходит крепление данных матриц друг к другу при помощи специального токопроводящей пасты. Данную конструкцию, состоящую из двух матриц, помещают в голову механического рекомбинатора и делают несколько отпечатков голографического рельефа голограммы на поликарбонатной пластине. Большого количества качественных отисков данной конструкцией к сожалению получить не удаётся. В результате голограмма на поликарбонатной пластине содержит дополнительный защитный элемент, который не удалось включить в голограмму на этапе записи. Данная поликарбонатная пластина уже будет выступать в качестве оригинала голограммы, после чего идёт стандартный цикл изготовления матриц.

Данный способ подходит для внедрения защитных элементов с габаритными размерами не менее 1 мм.

THE MECHANICAL FORMATION OF HOLOGRAPHIC SECURITY ELEMENTS BY RECOMBINATION

Gorcharuk A.I., Moiseenko P.V., Tanin L.V., Boboreko A.G.
(JSC «Holography Industry», Minsk, Republic of Belarus)

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ АНАЛОГОВЫХ ГОЛОГРАММ ПО ЗАМКНУТОМУ ЦИКЛУ

Мустафин М.К.

(ООО «Муссон», г. Казань)

Предприятие было создано в 1990 году Людмилой Таировной Мустафиной [1] при участии Камиля Сабиновича Мустафина [2].

Изначально главное внимание уделялось поиску и разработке новых схем записи голограммы, обеспечивающих их высокую защищённость от подделок, а также разработке и созданию оборудования по всей технологической цепочке.

В докладе приводятся сведения о научно-технической и коммерческой деятельности предприятия.



К.С.Мустафин



Л.Т. Мустафина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мустафина Л.Т.* «Исследование и разработка голографических методов и систем для изучения газовых потоков низкой плотности», диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук.

2. *Мустафин К.С.* «Исследование отображающих свойств голограмм и возможностей их применения в оптическом приборостроении», диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук.

CLOSED CYCLE FABRICATION OF ANALOG HOLOGRAMS

Mustafin M.K.

(OJSC «Musson», Kazan)

The enterprise was founded in 1990 by Lyudmila Tairovna Mustafina [1] with the assistance of Kamil Sabirovich Mustafin [2].

At first, the principal goals were: search for and development of new hologram recording layouts which were highly fake proof, and development of equipment for the whole processing line.

The paper presents information on scientific and technical and commercial activities of the enterprise.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ С ПОМОЩЬЮ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Колючкин В.В., Злоказов Е.Ю., Одинокоев С.Б., Талалаев В.Е., Цыганов И.К.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

Введение

Целью настоящей работы является разработка метода, позволяющего осуществлять объективную оценку качества ЗГ. Защитные голограммы состоят из набора голографических оптических элементов (ГОЭ) и дифракционных оптических элементов (ДОЭ), представляющих собой элементарные фазовые отражательные дифракционные решетки (ДР). О качестве защитных голограмм можно судить по соответствию значений параметров рельефа этих решеток эталонным. Под эталонными ДР можно понимать решетки, которые были заложены в дизайн мастер-матриц на стадии их разработки, или решетки, параметры которых были измерены на заведомо отобранных экспертами образцах мастер-матриц [1].

Качество конкретного образца ЗГ зависит от значений основных параметров ДР. Такими основными параметрами элементарной ДР – голопикселя, являются:

- пространственная частота ν_x или период $T = \frac{1}{\nu_x}$;
- глубина d фазового рельефа;
- количество N периодов в голопикселе;
- ориентация ϕ ДР.

Так как период решеток имеет значение порядка 1 мкм, то для контроля перечисленных параметров иногда применяют метод, основанный на прямом измерении с использованием микроскопов, в том числе конфокальных или атомно-силовых микроскопов [2]. Недостатками этого метода являются трудоёмкость и длительность проведения измерений параметров профиля, а также дороговизна измерительного оборудования.

Альтернативой методу прямых измерений является косвенный метод измерения, когда о параметрах ДР можно судить на основе анализа дифракционного распределения. В настоящей работе приводятся результаты исследований, позволяющие по параметрам дифракционного распределения оценивать параметры поверхностного микрорельефа голографических и дифракционных оптических элементов.

Результаты расчетов

На основе скалярной теории дифракции [3, 4] была разработана программа и выполнены исследования зависимости перечисленных параметров дифракционного распределения от параметров ДР с гармоническим фазовым распределением. Результаты расчётов представлены в виде графиков.

На рис. 1 представлено угловое распределение составляющей интенсивности в порядках дифракции при периоде дифракционной решетки 1,5 мкм и длине волны излучения 600 нм.

На рис. 2 для различных длин волн излучения представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1-ом порядке дифракции излучения от глубины рельефа ДР при нормальном падении излучения. Зависимости представлены для излучения с длинами волн 400, 500, 600, 650, 700 нм.

На рис. 3, в качестве примера, представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1-ом и 2-ом порядках дифракции от глубины рельефа ДР при падении излучения под углом 60° . Зависимости представлены для излучения с длиной волны 405 нм.

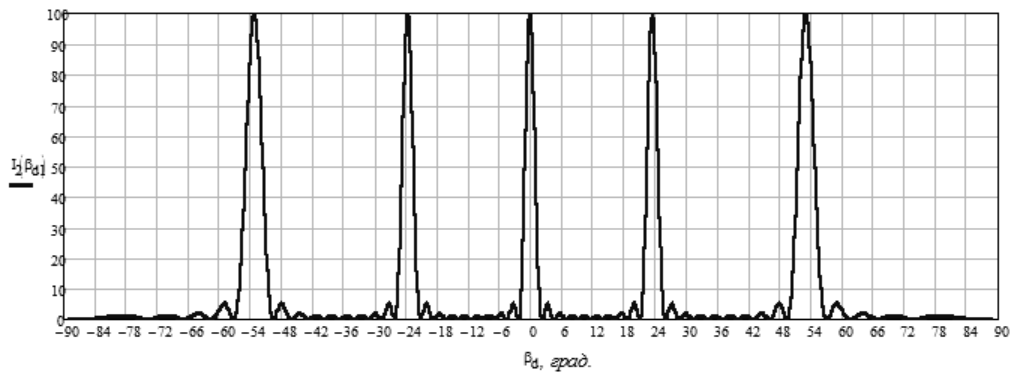


Рис. 1. Распределение составляющей интенсивности в порядках дифракции

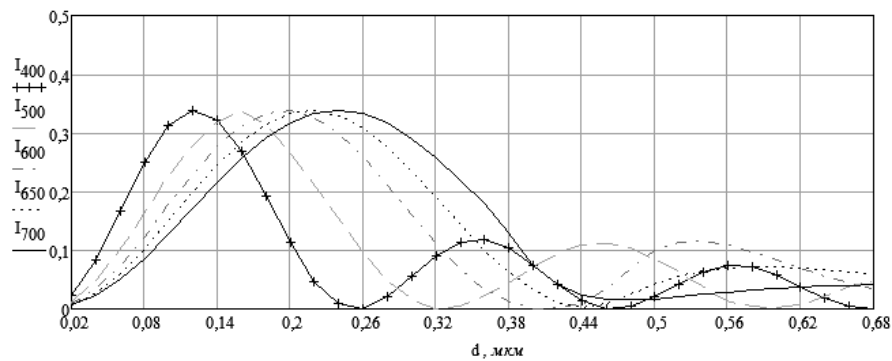


Рис. 2. Распределение интенсивности при $T = 1 \text{ мкм}$

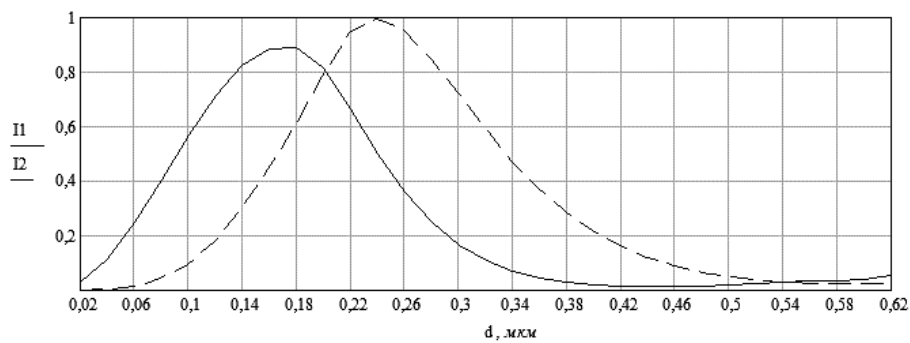


Рис. 3. Распределение интенсивности при $T = 1 \text{ мкм}$ при угле падения 60°

Принцип действия устройства представляется следующим образом. Излучение от лазерного диода падает под углом α на контролируемый образец ДОО-ГОЭ. Порядки дифракции регистрируются фотоприёмными устройствами (ФПУ).

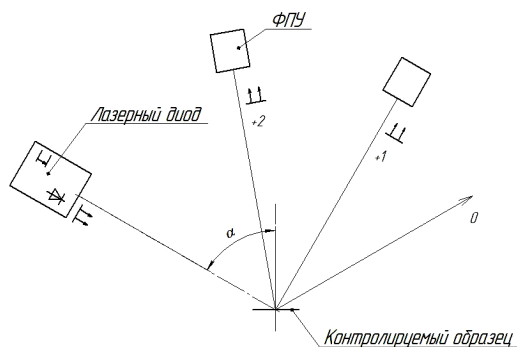


Рис. 4. Функциональная схема устройства

Заключение

Проведенные теоретические исследования подтверждают возможность контроля качества защитных голограмм с использованием предложенного метода косвенного измерения параметров фазовых дифракционных решеток. Получены зависимости, устанавливающие связь между параметрами дифракционного распределения и параметрами поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kolyuchkin V.V.* Correlation method for quality control of master matrix used for embossing security holograms / V.V. Kolyuchkin, A. Yu. Zherdev, E. Yu. Zlokazov, D.S. Lushnikov, S.B. Odinkov, A.V. Smirnov // Holography: Advances and Modern Trends III, Proc. Of SPIE. – 2013. – Vol. 8776. – P. 87760A.
2. *Бессемельцев В.П.* Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии / В.П. Бессемельцев // XI международная конференция Голоэкспо-2014: сборник научных трудов. – 2014.
3. *Хорохоров А.М.* Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений / А.М. Хорохоров, А.М. Клищук, И.К. Цыганов, С.Б. Одинок, А.Ф. Ширанков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Сер. Приборостроение. – 2005. – № 4.
4. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; под ред. Г.П. Мотулевич. – изд. 2-е. – М.: Наука, 1973.

THE METHOD OF DETERMINING THE DEPTH OF MICRORELIEF SECURITY HOLOGRAMS SURFACE USING COHERENT-OPTICAL SYSTEM

Koluchkin V.V., Zlokazov E.Yu., Odinkov S.B., Talalaev V.E., Tsiganov I.K.

(MSTU. N.E. Bauman, Moscow)

Abstrakt

Security holograms are perspective for document and product authenticity protection. The quality of security holograms and master-matrices significantly depends on perfection of diffraction grating. Authors represent the quality inspection method of security hologram based on indirect measurements of diffraction grating parameters. The theoretical results of this method application for quality inspection are shown in this paper.

РАЗРАБОТКА УФ-КЛЕЯ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ТИСНЕНИЯ ФОЛЬГОЙ

Бабкин О.Э.¹, Жданова А.В.^{1,2}, Михайлов В.Н.^{1,2}

(¹ ФГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения», Санкт-Петербург;

² ООО «ХолоГрэйт», Санкт-Петербург)

Аннотация

В работе приводятся исследования влияния олигомерно-мономерного состава на клеящую способность УФ-клея для холодного тиснения фольгой.

В настоящее время в технологии холодного тиснения используются УФ-клеи зарубежного производства. В условиях импортозамещения становится актуальной разработка составов отечественного производства.

Основными производителями фотополимеризующихся клеев на сегодняшний день являются: Zeller+Gmelin Corporation (Германия), Coatings and Adhesives Corporation (США), Ink Systems Inc. (США), INX International Ink Co. (США), Joules Angstrom U.V. Printing Inks (США), АСТЕГА Kelstar (США) и т.д.

Холодное тиснение – это процесс нанесения фольги на запечатываемый материал с помощью специального клея, полимеризующегося под действием УФ-излучения. В последние годы технология холодного тиснения набирает популярность, т.к. она является более простой и выгодной с экономической стороны. Главное достоинство данной технологии заключается в возможности нанесения металлизированного покрытия на термочувствительные материалы, поскольку в процессе не используется нагрев.

Выделяют две разновидности холодного тиснения: «сухой» и «мокрый» способы.

При «сухом» тиснении первичное отверждение клея осуществляется до припрессовки фольги. Тиснение осуществляется с помощью флексографической машины для холодного тиснения (рис. 1). Используемый УФ-клей с катионным механизмом полимеризации наносится на поверхность запечатываемого материала, затем происходит активация адгезива ультрафиолетовым излучением, после чего на него наносится фольга для холодного тиснения. В местах поверхности, на которые был нанесен клей, фольга отделяется от несущего слоя и переносится на запечатываемый материал [1, 2].

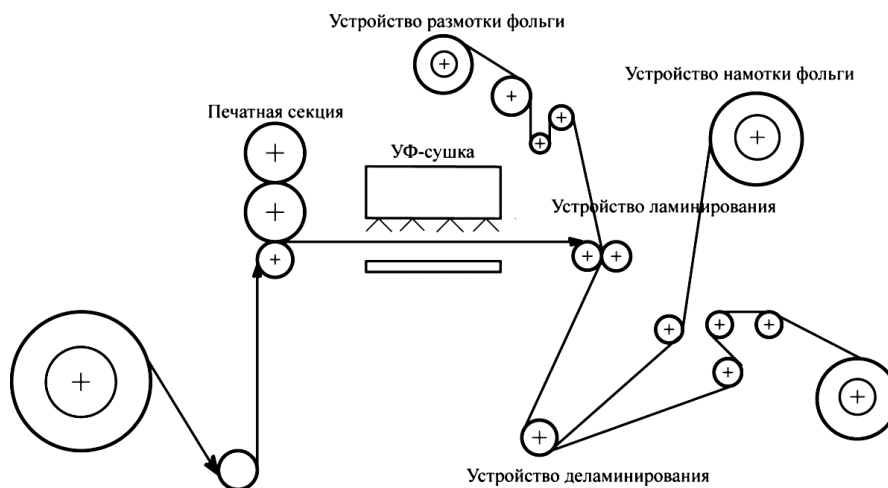


Рис. 1. Технологическая схема машины для «сухого» тиснения [1]

При «мокром» тиснении активация клея производится после припрессовки фольги. Тиснение проводится на офсетной машине для холодного тиснения (рис. 2). При использовании данного оборудования фольга для холодного тиснения переносится на поверхность запечатываемого материала после нанесения УФ-клея. В сушильном устройстве УФ-излучение проходит через несущий слой фольги, в результате чего происходит активация адгезионного слоя и его затвердевание. После чего происходит отделение несущего слоя [1, 2]. В данной технологии используется клей с радикальным механизмом полимеризации.

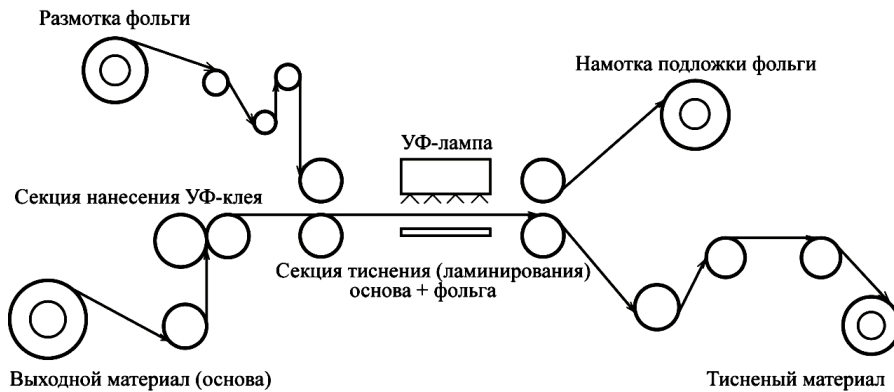


Рис. 2. Технологическая схема машины для «мокрого» тиснения [1]

Для осуществления качественного тиснения и получения прочной склейки субстратов, клеевые композиции должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь высокий показатель смачиваемости, т.е. поверхностное натяжение клея должно быть на 10 мН/м меньше поверхностной энергии материала, на который он наносится;
- иметь оптимальное значение вязкости, не выше 1300 - 1500 мПа*с, что обеспечит легкое нанесение клея на субстрат;
- время отверждения композиции должно быть достаточным для осуществления тиснения на флексографической машине, оснащенной лампой мощностью 100-200 Вт/см, при скорости тиснения 150 м/мин;
- образовывать прочную и эластичную пленку, не разрушающуюся при дальнейшей эксплуатации изделий.

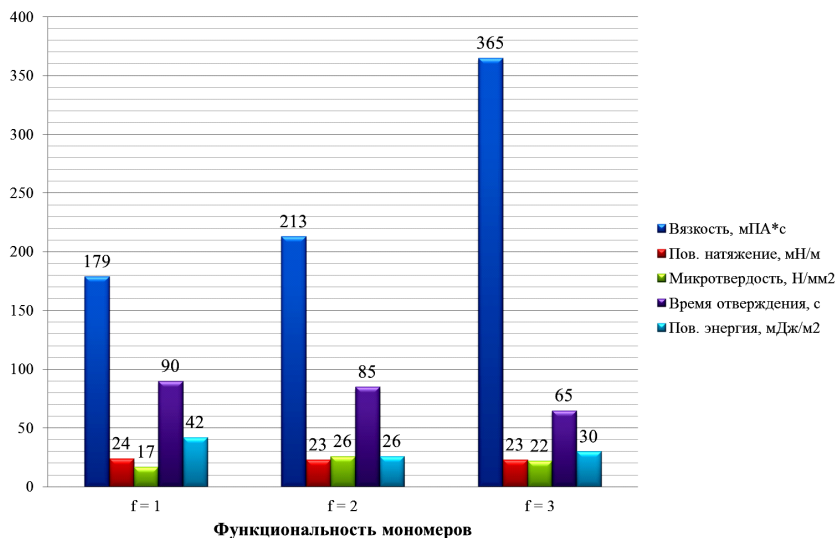


Рис. 3. Характеристики ФПК в зависимости от функциональности мономера

Для дальнейших исследований в лабораторных условиях были приготовлены фотополимеризующиеся композиции различных составов. Также были исследованы их свойства различными методами. Получены значения динамической вязкости, поверхностного натяжения жидких составов, а также значения поверхностной энергии, микротвердости, адгезионной прочности отвержденных пленок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров В.И. Технология послепечатных процессов. Технология тиснения. учеб. пособие / В.И. Бобров, Л.О. Горшкова, Е.И. Лисиченко, В.А. Мисонжник. – Москва: МГУП, 2006. – 196 с.
2. Гудилин Д. Тиснение фольгой // КомпьюАрт. – 2006. – № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.compuart.ru/article.aspx?id=15329&iid=728> (дата обращения: 23.06.2015).
3. Бабкин О.Э. Полимерные покрытия УФ-отверждения: учеб. пособие. – СПб.: изд. СПбГУКиТ, 2012. – 47 с.
4. Бабкин О.Э. УФ-полимеризующиеся композиции для холодного тиснения фольги / О.Э. Бабкин, Л.А. Бабкина, А.В. Жданова, О.В. Круглякова // Инновационные материалы и технологии в дизайне: Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции с участием молодых ученых, 19, 20 марта 2015г. – СПб.: СПбГИКиТ, 2015. – 93 с. – С.59 – 60.

UV-ADHESIVE FOR COLD FOIL STAMPING

Babkin O.E.,¹ Zhdanova A.V.,^{1,2} Mikhailov V.N.^{1,2}

(¹ St. Petersburg State Institute of Cinema and Television, St. Petersburg;

² Company «HoloGrate» St. Petersburg)

Abstrakt

The paper presents the study of influence of oligomeric-monomer composition on the ability of an adhesive UV-adhesive for cold foil stamping.

ИЗМЕРЕНИЕ УСАДКИ РЕГИСТРИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ

Герасимова Ю.В.,¹ Ильина В.В.,¹ Михайлов В.Н.^{1,2}

(¹ Санкт-Петербургский институт кино и телевидения;

² ООО «Хологрэйт», г. Санкт-Петербург)

Предложена методика определения усадки регистрирующих материалов при записи голограмм. Согласно [1], изменение толщины голограммы Δd можно оценить, измеряя изменение угла наклона интерференционных плоскостей в объеме среды по формуле:

$$\frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\tan \varphi_1}{\tan \varphi_0} - 1,$$

где d_0 – исходная толщина регистрирующего материала; $\Delta d = d_0 - d_1$, d_1 – конечная толщина регистрирующего материала; φ_0 и φ_1 – угол наклона интерференционных плоскостей в начальный момент и после окончания записи. Тогда усадка определяется как $\delta_{shr} = d_1/d_0$.

Однако, точность метода невелика при больших значениях усадки. В работе [2] усадку предложено измерять, используя запись голограмм во встречных пучках с различным периодом голографической структуры. В предлагаемом методе используется запись наклонных голографических структур согласно рис. 1. При этом один из пучков падает перпендикулярно поверхности регистрирующего материала, а второй под некоторым углом. После записи голограммы, о чем можно судить по появлению дифрагированного излучения после закрывания одного из пучков, фотополимерный материал продолжают засвечивать опорной волной с целью завершения процессов полимеризации. Затем, поворачивая голограмму на вращающемся столике, снабженном микрометрическими винтами, определяют угловую селективность и положение максимума дифракционной эффективности (рис. 2). Отклонение χ биссектрисы угла между пучками в воздухе позволяет определить усадку материала δ_{shr} (рис. 3).

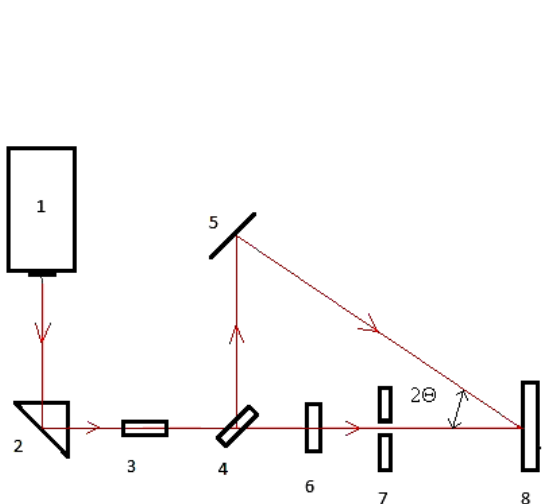


Рис. 1. Оптическая схема записи голограммы:
1 – лазер DPSS ($\lambda = 473$ нм); 2 – поворотная призма; 3 – телескоп 3^x; 4 – делитель; 5 – зеркало; 6 – нейтральный светофильтр; 7 – ирисовая диафрагма; 8 – фотоматериал

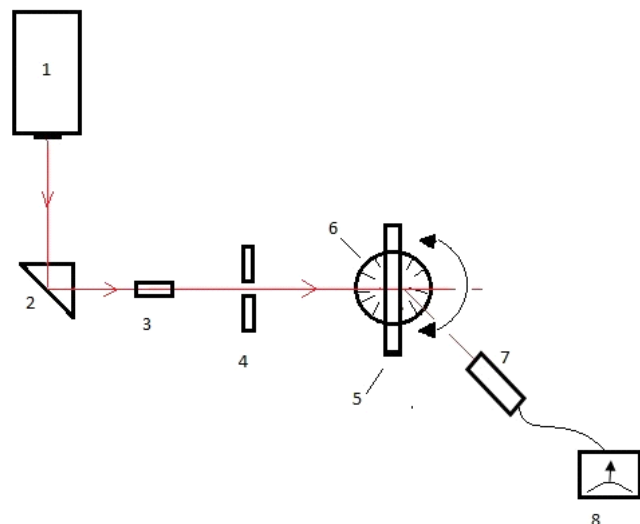


Рис. 2. Оптическая схема измерения ДЭ:
1 – лазер DPSS ($\lambda = 473$ нм); 2 – поворотная призма; 3 – телескоп 3^x; 4 – диафрагма; 5 – фотоматериал; 6 – поворотный столик; 7 – фотодиод; 8 – цифровой вольтметр

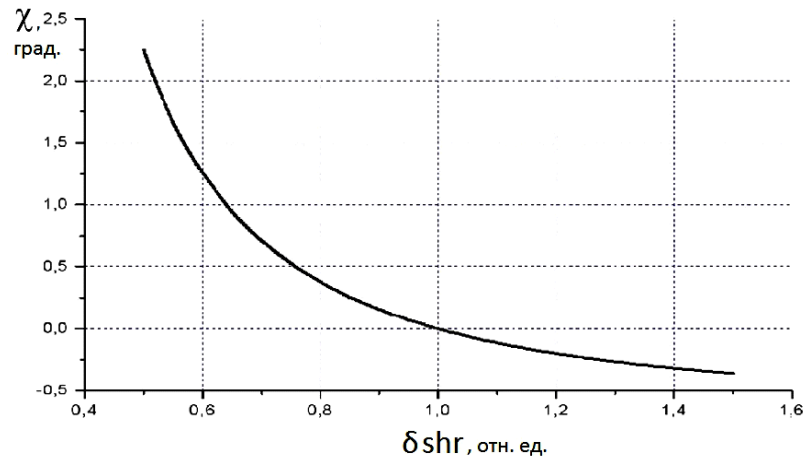


Рис. 3. Зависимость отклонения χ биссектрисы угла между пучками в воздухе от усадки δ_{shr} ($\lambda = 473$ нм, $2\Theta = 32^\circ$)

Показано, что методика позволяет измерять усадку не только фотополимерных материалов, но и БХЖ, а также галогенсеребряных желатиновых эмульсий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gallo J.T., Verber C.M. «Model for the effects of material shrinkage on volume holograms», *Applied Optics*, Vol. 33, Issue 29, pp. 6797-6804, (1994).
2. Пен Е.Ф., Зарубин И.А., Шелковников В.В., Васильев Е.В., Chil-Sung Choi. «Методика определения параметров эффективной усадки голографических фотополимерных материалов», в сборнике трудов 11-й Международной конференции «ГолоЭкспо–2014», 16–17 сентября 2014 г., с. 205-213.

MEASUREMENT OF SHRINKAGE OF MATERIALS DURING HOLOGRAM RECORDING

Gerasimova Yu.V.,¹ Ilina V.V.,¹ Mikhailov V.N.^{1,2}

(¹ St. Petersburg Institute of Cinema and Television;

² JSC «HoloGrate», St. Petersburg)

A method for determining shrinkage of materials during hologram recording is proposed. According to [1], the change in thickness of the hologram Δd can be estimated by measuring the change in angle of the interference planes in the volume of the medium by the formula:

$$\frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\tan \varphi_1}{\tan \varphi_0} - 1,$$

where d_0 – the initial thickness of the recording material; $\Delta d = d_0 - d_1$, d_1 – the final thickness of the recording material; φ_0 and φ_1 – the angles of the interference planes at the initial time and after recording, correspondingly. Then, the shrinkage is defined as the $\delta_{shr} = d_1/d_0$.

However, the accuracy of the method is insufficient for large values of shrinkage. In paper [2] it was suggested to measure shrinkage by recording reflection holograms with different periods of holographic structure. The proposed method uses a holographic recording of inclined structure. Thus one of the beams falls perpendicular to the surface of the recording material, and the second one at a

certain angle. After recording the hologram, which can be judged by the appearance of the diffracted light after the closing of one of the beams, the photopolymer material is still irradiated by the reference beam in order to complete the polymerization process. Then, turning the hologram on the rotary table equipped with micrometer screw, one can determine the angular selectivity and position of the maximum of diffraction efficiency. Deviation χ of the bisector of the angle between the beams in the air determines the shrinkage δ_{shr} of the material (fig. 1).

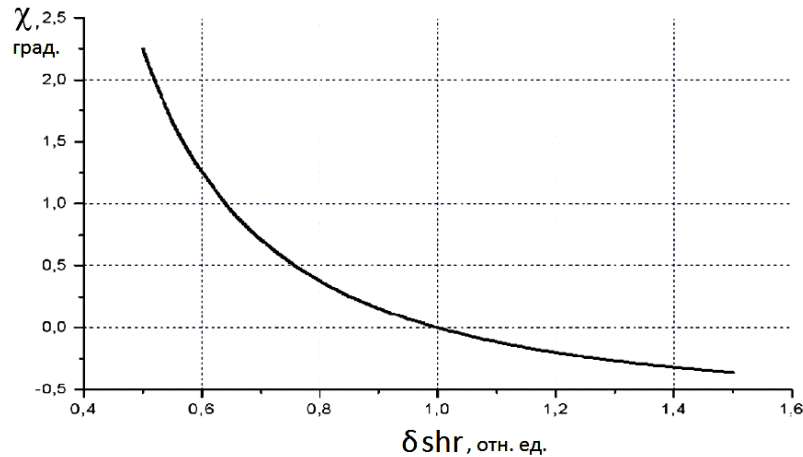


Fig. 1. Deviation χ of the bisector of the angle between the beams in the air vs shrinkage δ_{shr} ($\lambda = 473$ nm, $2\Theta = 32^\circ$).

It is shown that the method can be used not only to measure the shrinkage of photopolymeric materials but also such as DCG and silver halide gelatin emulsions.

REFERENCES

1. Gallo J.T., Verber C.M. «Model for the effects of material shrinkage on volume holograms», *Applied Optics*, Vol. 33, Issue 29, pp. 6797-6804 (1994).
2. Pen E.F., Zarubin I.A., Shelkovnikov V.V., Vasiliev E.V., Chil-Sung Choi. «Technique for determining the parameters of effective shrinkage of the photopolymer materials» in the Proceedings of the 11th International Conference «HoloExpo-2014», 16-17 September 2014, pp. 205-213.

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ (10,6 МКМ) С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Иштимиров Д.Б., Комоцкий В.А., Суетин Н.В.

(Российский университет дружбы народов, г. Москва)

Управление мощностью ИК излучения основано на дифракции когерентного оптического пучка при отражении от глубокой рельефной дифракционной структуры (ДС), которая имеет прямоугольный профиль с формой меандра. Глубина h этой ДС составляет от половины до нескольких длин световой волны λ . Зависимость мощности нулевого порядка дифракции от угла падения имеет следующий вид [1]:

$$P_0 = P_{\text{пад}} R \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \Theta \right).$$

В этой формуле $P_{\text{пад}}$ – мощность падающего лазерного излучения, R – коэффициент отражения излучения от поверхности решетки Θ – угол падения пучка на ДС. Плоскость падения – отражения направлена вдоль линий (каналов) ДС. Нормированный расчетный график зависимости мощности нулевого порядка дифракции от угла падения лазерного пучка $P_0/P_{\text{эфф}}$ при глубине рельефа $h = 1,41\lambda$ изображён на рис. 1. Принцип работы модулятора был подробно описан в [1, 5], сущность его следующая. Если выбрать начальный угол падения посередине одного из линейных участков зависимости, изображенной на рис. 1, то небольшие угловые отклонения ДС в плоскости падения – отражения будут вызывать пропорциональные изменения мощности излучения в нулевом порядке дифракции. Имеет место линейный режим модуляции мощности. При изменении угла падения – отражения в более широких пределах, от Θ_{min} до Θ_{max} , будут происходить изменения мощности от нулевого до максимального значения, но без сохранения линейной зависимости. Изменение мощности в этой схеме сопровождается изменением направления выходного модулированного пучка нулевого порядка. Альтернативная схема, в которой направление модулированного пучка не изменяется, описана в [3].

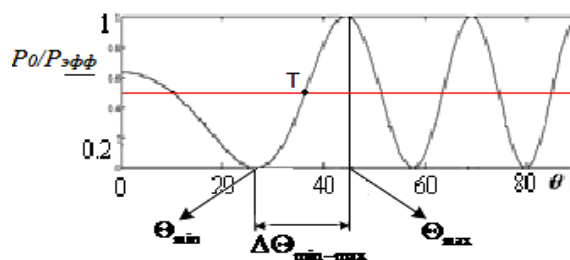


Рис. 1. График зависимости мощности нулевого порядка дифракции от угла падения лазерного пучка при глубине рельефа $h = 1,41\lambda$

Описание экспериментов по управлению мощностью излучения с длиной волны 10,6 мкм. Для работы на длине волны 10,6 мкм ДС была изготовлена на поверхности медной полированной пластины с применением метода лазерной гравировки. Гравировка проводилась на установке МиниМаркер 2 последовательным точечным удалением материала с поверхности. Размер отдельной точки порядка 50 мкм. Поэтому для формирования канавки проводили гравировку ряда точек с шагом 50 мкм, а затем проводили гравировку параллельного ряда точек со сдвигом вбок на 50 мкм. В некоторых образцах проводили дополнительную выравнивающую гравировку по средней линии с боковым сдвигом 25 мкм. Гравировку проводили с умеренной мощностью, на глубину порядка 4-5 мкм при одном проходе. При трёх последовательных проходах получали канавку с глубиной порядка 15 мкм, и с шириной 100 мкм. Набор канавок с периодом 200 мкм составил отражающую ДС. Профиль ДС приведен на рис. 2. Неровности, образовавшиеся в процессе изготовления имеют амплитуду δh порядка $\delta h = 1-2$ мкм, однако это намного меньше длины волны 10,6 мкм, и это позволяет использовать полученную структуру для получения выраженных дифракционных порядков излучения.

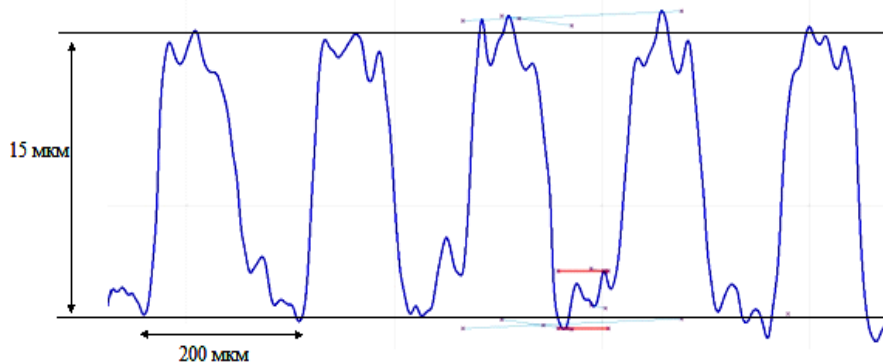


Рис. 2. Профиль отражающей ДС, изготовленной методом лазерной гравировки. Глубина решетки составляет 15 мкм, неровности имеют амплитуду $\delta h = 1-2$ мкм

Мощность излучения в порядках дифракции измерялась тепловым приемником ИК излучения на основе двух полупроводниковых диодов.

При изменении угла падения-отражения происходило изменение соотношения мощностей излучения в порядках дифракции. Полученная в ходе эксперимента зависимость приведена на рис. 3.

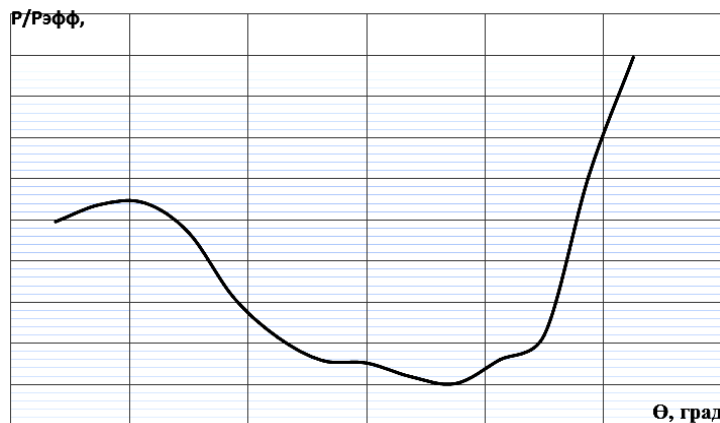


Рис. 3. Экспериментальный график зависимости мощности нулевого порядка дифракции от угла падения лазерного пучка 10,6 мкм для ДС с глубиной рельефа $h = 15$ мкм

Как видно из рис. 3, при изменении угла падения-отражения мощность в нулевом порядке дифракции изменяется от 10 до 90% от мощности падающего на решетку излучения. При этом график зависимости, полученной экспериментально, в целом совпадает с теоретическим. Таким образом, отражающие ДС, полученные методом лазерной гравировки, могут быть использованы для управления мощностью ИК излучения 10,6 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В.*, Модулятор лазерного излучения. // Радиотехника и электроника, 2012. Т. 57, №6. С. 1-4.
Komotskii V.A., Sokolov Yu. M., Basisty E.V., Modulator of Laser Radiation. // Journal of Communication Technology and Electronics, 2012. Vol 57. Pp. 751-754.
2. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М.*, Модулятор лазерного излучения. Патент РФ на изобретение № 2411620. Зарегистрирован 10 февр. 2011 г. Приоритет от 13 авг. 2009 г.
3. *Комоцкий В.А.*, Модулятор лазерного излучения. Патент РФ на изобретение № 2477914. Зарегистрирован 20 марта 2013 г. Приоритет от 24 марта 2011 г.
4. *Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В.*, Метод измерения глубины периодических рельефных отражателей поверхностных акустических волн лазерным зондированием. // Радиотехника и электроника, 2011. Т. 56. № 2. С. 243-248.

CONTROL OF INFRARED (10,6 μ k) RADIATION POWER WITH USE OF REFLECTING DIFFRACTION GRATING

Ishtimirov D.B., Komotskii V.A., Suetin N.V.
(*People friendship university of Russia (PFUR)*)

Reflecting diffraction grating (RDF) with the depth of the order from one half to several wavelengths can be used for modulation of power of the zero diffraction order. The modulation takes place, when the incident angle of the laser beam is changed due to tilting of the plate with RDF. Small linear modulation is possible. Also 100% modulation is possible, but without linearity. The specimen for experiment was made with use of laser etching technology on the surface of polished copper plate. The depth of the experimental RDF around 10 microns, the rough of structure was about one micron. Diffraction of CO₂ laser radiation on the RDF was obtained. Changing of power of the zero diffraction order of the range of 70% was measured.

ОБЪЕМНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ КАК ДИСПЕРГИРУЮЩИЕ И ФИЛЬТРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Пряхин Ю.А., Яковлев Е.В.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Под дифракцией понимают физические эффекты распространения волн, которые объясняются с помощью принципа Гюйгенса-Френеля и описываемые формулами Френеля-Кирхгофа. По принципу Гюйгенса-Френеля вторичные источники, создающие дифрагированную волну, располагаются на некоторой поверхности (плоскости). В дальней зоне Фраунгофера – распределение поля дифрагированной волны пропорционально преобразованию Фурье от распределения поля в области объекта (щель, отверстие, дифракционная решетка).

При этом предполагается, что толщина объекта физически мала (порядка длины волны).

Важнейшим случаем дифракции света является дифракция света на дифракционных решетках (ДР), представляющих из себя периодические изменения поверхности решетки или показателя преломления её объема. Для случая плоских классических дифракционных решеток направление распространения падающей и дифрагированных волн дается так называемым уравнением решетки, которое можно получить из принципа Гюйгенса-Френеля, описывающего интерференцию волн, испускаемых отдельными участками волнового фронта в плоскости решетки. Несмотря на лучевое приближение этого уравнения, оно очень широко применяется в прикладной оптике.

Это уравнение описывает пространственную дисперсию волн – различные углы распространения волн различной длины,

$$d \cdot (\sin \varphi + \sin \theta) = m \cdot \lambda, \quad (1)$$

где d – период решетки; φ, θ – углы падения и дифракции волн; m – порядок дифракции; λ – длина волны света.

Изменение угла дифракции φ для классических решеток велико для краев видимого диапазона спектра (0,38...0,74 мкм) оно составляет около 35° (для $d = 0,833$ мкм, решетка 1000 мм^{-1}) и ограничивается наложением спектров различных порядков.

Существует отдельный вид современных решеток-объемные решетки-решетки на фоторефрактивных кристаллах (решетки в ниобате лития). В голографии широко используются фазовые решетки на основе бихромированной желатины (БХЖ). При фотографической записи интерференционной картины наложения двух когерентных волн в объеме БХЖ образуются периодические изменения величины показателя преломления – так формируется решетка пространственной плотности поляризованности среды.

Характерные параметры таких решеток-толщина 10-30 мкм, среднее значение показателя преломления $-1,52$ ($\lambda = 0,633$ мкм), изменение показателя преломления порядка 0,01 – 0,005. Рассеяние волн такой решеткой также называется дифракцией однако механизм её другой.

Направление распространения дифрагированной волны дается формулой Брэгга

$$2d \cdot (\sin \theta_0) = \frac{\lambda}{n}, \quad (2)$$

где θ_0 – угол между направлением распространения падающей волны и изофазными изменениями показателя преломления решетки, при этом угол между направлениями падающей и дифрагированной волн дается соотношением

$$\bar{K}_d = \bar{K}_l - \bar{K}, \quad \bar{K} = \frac{2\pi}{d}, \quad (3)$$

где \bar{K}_d, \bar{K}_l – волновые векторы падающей и рассеянной волн, вектор решетки.

Для объяснения появления дифрагированной волны в толстых решетках можно исходить из представления об электромагнитной волне в среде как о суперпозиции поля падающего излучения и вторичных волн, вызываемых вынужденными колебаниями зарядов. В однородной среде в результате интерференции этих волн, возникает волна, распространяющаяся в первоначальном направлении но со скоростью, отличающейся от скорости света в вакууме. В оптически неоднородной среде колеблющиеся заряды, помимо такой волны, образуют рассеянное излучение. Его источником является та часть переменного дипольного момента среды, обусловленная отклонением локальных параметров среды от средних значений. В объёме среды под действием падающей волны возникают колебания дипольного момента, геометрические местом точек, для которых такие колебания синфазны, являются плоскости. Из-за большой разности фаз электромагнитные волны, излучаемые различными частями области взаимодействия света и решетки, взаимно гасят друг друга. Однако при определенных направлении волнового вектора света и вектора решетки волны, идущие по направлению на дифракционный максимум от различных точек области взаимодействия, оказываются синфазными. Условие резонансной дифракции (условие фазового синхронизма) дается соотношением (3). При брэгговской дифракции отклонение света происходит только в первый порядок.

Для определения интенсивности дифрагированной решетки используют теорию связанных волн в которой рассматривают распространение в решетке двух волн – падающей (R) и дифрагирующей под углом Брэгга волны (S), рассматривая решение волнового уравнения при периодической модуляции показателя преломления среды [1, 2].

Получают систему уравнений связанных волн

$$C_R \cdot \bar{R}' + \alpha \cdot R = i \cdot \chi \cdot \bar{S}; \quad (4)$$

$$C_S \cdot \bar{S}' + (\alpha + i\Gamma) \cdot \bar{S} = i \cdot \chi \cdot \bar{R}, \quad (5)$$

где \bar{R}, \bar{S} – комплексные амплитуды падающей и дифрагированной волн; C_R, C_S – постоянные параметры, выражающиеся через параметры решетки и распространяющихся волн. Эти уравнения связанных волн показывают, что при распространении падающей и дифрагированных волн сквозь решетку на расстояние амплитуды этих волн изменяются на dR, dS . Этому изменению соответствует поглощение, описываемое членами dR, dS или поглощение волн, описываемое членами взаимодействия $\chi \cdot \bar{R}, \chi \cdot \bar{S}$. Член $i\Gamma \bar{S}$ соответствует добавочному фазовому множителю в дифрагированной волне. Если угол под которым распространяется падающая волна сильно отличается от угла Брэгга, величина будет большой. В результате дифрагированная волна выходит из синхронизма с падающей волной, что приводит к ослаблению связи волн.

Для пропускающей фазовой решетки с изофазными поверхностями перпендикулярными её поверхности получено выражение для дифракционной эффективности

$$\eta = \frac{|\bar{S}(T)|}{|\bar{R}(0)|} = \frac{|\bar{S}(T)|^2}{|\bar{R}(0)|^2} = \frac{\sin^2(\xi^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + \frac{\xi^2}{v^2}}; \quad (6)$$

$$\varepsilon = \delta \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{\lambda_a} \right) \cdot T \cdot \sin \theta_0, \quad (7)$$

где δ – отклонение угла падения волны от брэгговского угла; n – показатель преломления среды; T – толщина слоя; θ_0 – угол Брэгга.

$$v = \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda_a \cdot \cos \theta_0} = \frac{\chi \cdot T}{\cos \theta_0}, \quad (8)$$

где n_1 – переменная часть показателя преломления слоя; λ_a – длина волны в воздухе.

$$n_1 = \bar{n} + n_1 \cdot \cos \bar{K}, \quad (9)$$

где \bar{K} – вектор решетки.

Для определения пространственной и спектральной дисперсии брегговских решеток произведен расчет дифракционной эффективности решеток на БХЖ с параметрами $\lambda_a = 0,488$ мкм, толщина $T = 30$ мкм, угол Брэгга в слое $\theta_0 = 19,2^\circ$; $\bar{n} = 1,52$; расчетный параметр $v = \frac{\pi}{2}$; $\frac{\pi}{4}$; $\frac{2\pi}{4}$.

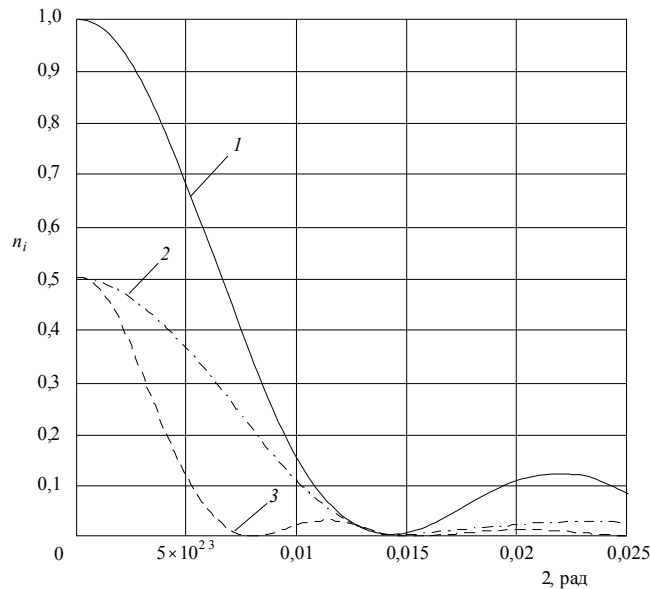


Рис. 1. Дифракционная эффективность решеток с различными параметрами отклонение от угла Брэгга: 1 – 30 мкм; 2 – 30 мкм; 3 – 40 мкм

Как следует из расчетов угловая дисперсия решеток толщиной 30 мкм очень мала – 0,007–0,014 рад, для решетки толщиной 15 мкм 0,28 рад, т.е. 1,6 в слое, при увеличении толщины решетки вдвое – угловая дисперсия уменьшается также вдвое (см. рис. 1).

Существует связь между параметром ξ и $\Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – величина изменения длины волны.

$$\xi = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_a} \cdot \operatorname{tg} \theta_0 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{\lambda_a} \right) \cdot T \cdot \sin \theta_0.$$

Эффективность голограммы в БХЖ падает до нуля для ранее приведенного примера при $\Delta\lambda = 0,0393$ мкм. Такая решетка может служить фильтром.

Существует другой вид фазовых толстых решеток у которых слои максимального изменения показателя преломления параллельны поверхности слоя-отражательные голограммы [1,4]. Эти голограммы используются в качестве фильтров с спектральной шириной 0,0059 мкм (5,9 нм).

С другой стороны, если записать в слое БХЖ решетки с большим периодом (порядка 2 мкм), то эффективность таких решеток падает до нуля при уловом отклонении падающего пучка $7,5^\circ$, однако они не обладают спектральной селективностью, так как дифракционная эффективность таких решеток больше 50 % для видимого диапазона.

Для спектральных приборов угол падения света на решетку задан, поэтому требуется учет приведенных выше свойств брегговских решеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кольер Р., Беркхардт К., Линн Л.* Оптическая голография. – «Мир», Москва, 1973. – 686 с.
2. *Малов А.Н.* Голографические регистрирующие среды на основе дихромированного желатина: супрамолекулярный дизайн и динамика записи. [Текст].
3. *Малов А.Н., Неупокоева А.В.* – Иркутск: ИВВАИУ(ВИ), 2006. – 345 с.
4. *Kogelnik H.* Coupled wave analysis for thick hologram gratings. Bell Syst. Tech. Journ – 1969. – Vol. 48. – P. 2909-2947.
5. *Owen H.* Holographic notch filter (HNF) Preprint Proc SPIE, Vol 15, San Diego. July, (1989).

THREE-DIMENSIONAL DIFFRACTION GRATING AS THE DISPERSING AND FILTERING ELEMENTS OF SPECTRAL INSTRUMENTS

Pryakhin Yu.A., Yakovlev E.V.

*(Kazan National Research Technical University
them. AN Tupolev (KNRTU-KAI), Kazan)*

Under diffraction understand the physical effects of wave propagation, which are explained by the principle of Huygens-Fresnel formulas described Fresnel-Kirchhoff. According to the principle of Huygens-Fresnel secondary sources, creating diffracted wave, located on a surface (plane). In the far field the Fraunhofer – field distribution of the diffracted wave is proportional to the Fourier transform of the field distribution in the region of the object (slit aperture diffraction grating). It is assumed that the thickness of an object physically small (of the order of a wavelength). The most important case is the diffraction of light by diffractive lattices (DL), is a periodic change in the surface of the grid or the refractive index of its volume. In the case of flat classical diffraction gratings direction of propagation of the incident and diffracted waves is given by the so-called equation of the lattice, which can be obtained from the Huygens-Fresnel principle that describes the interference of waves emitted by individual sections of the wave front in the plane of the grid. Despite the ray approximation of this equation, it is very widely used in applied optics. There is a separate type of advanced three-dimensional lattices, lattice-bars on photorefractive crystals (lattice in lithium niobate).

The holographic phase gratings are widely used on the basis of dichromated gelatin (DHZ). In order to explain the appearance of the diffracted wave in thick gratings can proceed from the view of the electromagnetic wave in a medium as a superposition of the incident radiation and the secondary waves caused by forced oscillations of the charges. To determine the intensity of the diffracted grating uses the theory of coupled waves which characterize the distribution in the lattice two volume fractions (R) and the diffracted wave at the Bragg angle (S), considering the solution of the wave equation with a periodic modulation of the refractive index of the medium.

REFERENCES

1. *Collier R., Berkhardt K., Lin L.* Optical Holography. – «Mir», Moscow, 1973. – 686 s.
2. *Malov, AN* Holographic recording medium based on dichromated gelatin: supramolecular design and dynamics of entry. [Text].
3. *Malov A.N. AV Neupokoeva* – Irkutsk IVVAIU (WI), 2006. – 345 p.
4. *Kogelnik, H.* Coupled wave analysis for thick hologram gratings. Bell Syst. Tech. Journ. – 1969. – Vol. 48. – P. 2909-2947.
5. *Owen H.* Holographic notch filter(HNF) Preprint Proc SPIE, Vol 15, San Diego. July, (1989).

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММНЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сагателян Г.Р.,¹ Одинокоев С.Б.,¹ Попов В.В.²

(¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана;

² МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва)

В качестве изделия для практической реализации комбинированного ГОЭ-ДОЭ рассматривали представленный на рис. 1 нерасстраиваемый геометрический эталон (НГЭ).

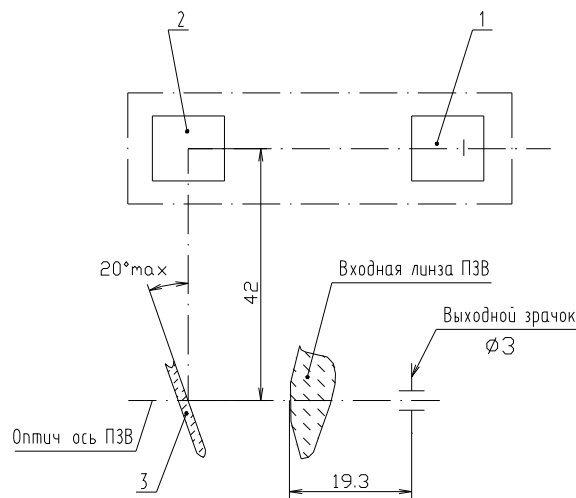


Рис. 1. Нерасстраиваемый геометрический эталон (НГЭ):

1 – объектив осветителя-коллиматора; 2 – устройство излома оси с диафрагмой под отверстия; 3 – голографический светоделиитель

Предметом усовершенствования являлась возможность устранения изломов оптической оси НГЭ и уменьшения угла наклона светоделиительного голографического элемента. Масса и габариты призмы для излома оси составляют большую часть веса и габаритов всей оптической схемы. Поэтому, благодаря применению разрабатываемого комбинированного ГОЭ-ДОЭ в качестве голографического светоделиителя, призма была устранена. Это позволило качественно снизить массу и габариты НГЭ и принципиально улучшить его тактико-технические характеристики.

Оптимизированный вариант компоновки НГЭ представлен на рис. 2. Оптическая схема голографического нерасстраиваемого геометрического эталона приведена на рис. 3.

Оптическая ось объектива осветителя-коллиматора наклонена к оптической оси объектива ПЗВ под углом 73° . Светоделиитель с ГОЭ расположен перпендикулярно оси объектива ПЗС. Таким образом, значительно уменьшены габариты и вес канала подсветки ГОЭ и устранены два изначально лишних элемента схемы. Объектив в данном варианте имеет световой диаметр 6,5 мм, что позволило сократить его фокальное расстояние до 24 мм. Объектив ахроматизирован в области длин волн от 0,63 до 0,68 мкм.

Оптическая схема НГЭ выполнена в виде моноблока и состоит из корпуса с установленным на нем ГОЭ и коллиматора с диафрагмами.

Конструкция обеспечивает возможность установки НГЭ на Изделие одновременно со штатной системой геометрического эталона. Тем самым обеспечивается возможность прове-

дения сравнительного анализа результатов работы НГЭ с ГОЭ и штатного геометрического эталона.

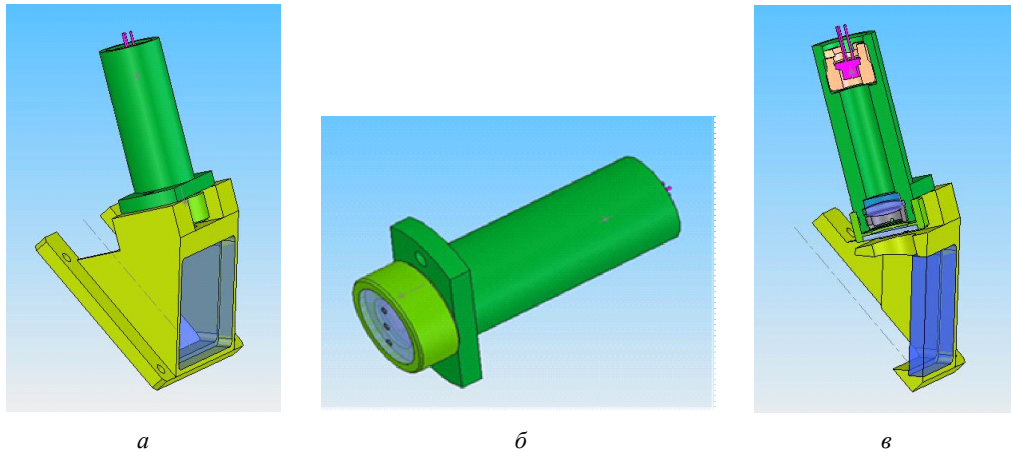


Рис. 2. Компоновка нового варианта НГЭ:
 а – внешний вид; б – лазер с оптической системой засветки; в – разрез

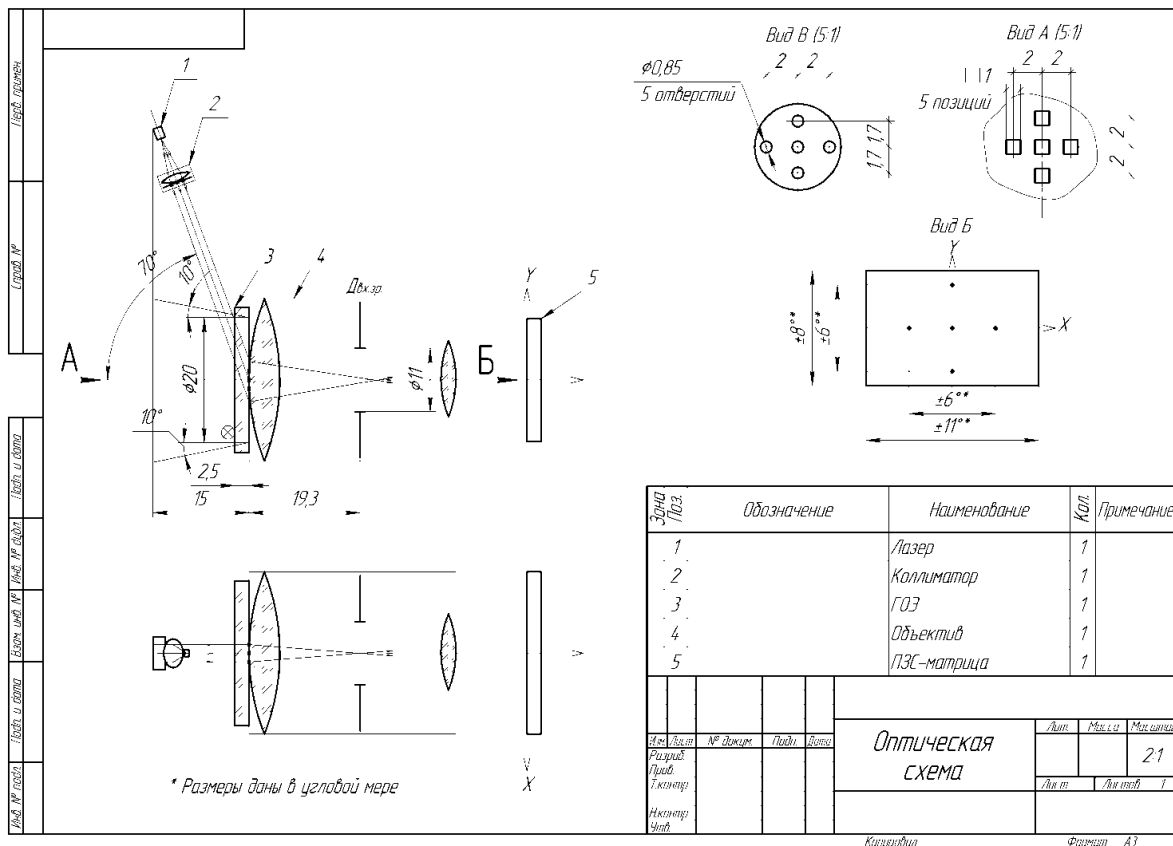


Рис. 3. Оптимизированная оптическая схема НГЭ:
 1 – лазер; 2 – оптическая система засветки; 3 – разрабатываемый комбинированный ГОЭ-ДОЭ;
 4 – корпус прибора с входным зрачком; 5 – ПЭС матрица

Принцип работы оптической схемы устройства (рис. 2, 3) заключается в следующем:
 а) источником монохроматического излучения в видимой части спектра света является лазер 1. Коллиматор 2 формирует параллельный световой пучок с обеспечением равномерного

распределения энергии светового излучения по всему световому пятну. На выходном торце коллиматора выполнена диафрагма, представляющая собой пять точек диаметром 0,85 мм, расположенных на расчетных расстояниях друг от друга.

б) Пять сформированных отверстиями в диафрагме лучей попадают на рабочую (правую) плоскость комбинированного ГОЭ-ДОЭ 3. При этом каждый из пяти лучей попадает на свою дифракционную решетку, имеющую форму квадрата с размером стороны 1 мм. Превышение размера дифракционных решеток над размерами соответствующих пучков необходимо для обеспечения возможности совершать установочные подвижки при юстировке.

в) Проходя через ГОЭ-ДОЭ, каждый из лучей дифрагирует под своим углом и, проходя через объектив, попадает на ПЗС-матрицу 5, формируя на ней требуемую картину из пяти опорных точек (ОТ).

Предполагается, что ПЗС-матрица расположена в фокальной плоскости объектива.

Реализация оптической схемы экспериментального образца в конструкции комбинированного ГОЭ-ДОЭ заключается в следующем.

Разрабатываемый комбинированный ГОЭ-ДОЭ должен представлять собой оптическую деталь – плоскопараллельную пластину, выполненную, например, в соответствии с конструкцией, представленной на рис. 4. Это наиболее эффективный способ решения проблемы создания НГЭ, заключающийся в применении ДОЭ, работающего на пропускание света и содержащего несколько дифракционных решёток – по одной на каждую формируемую точку.

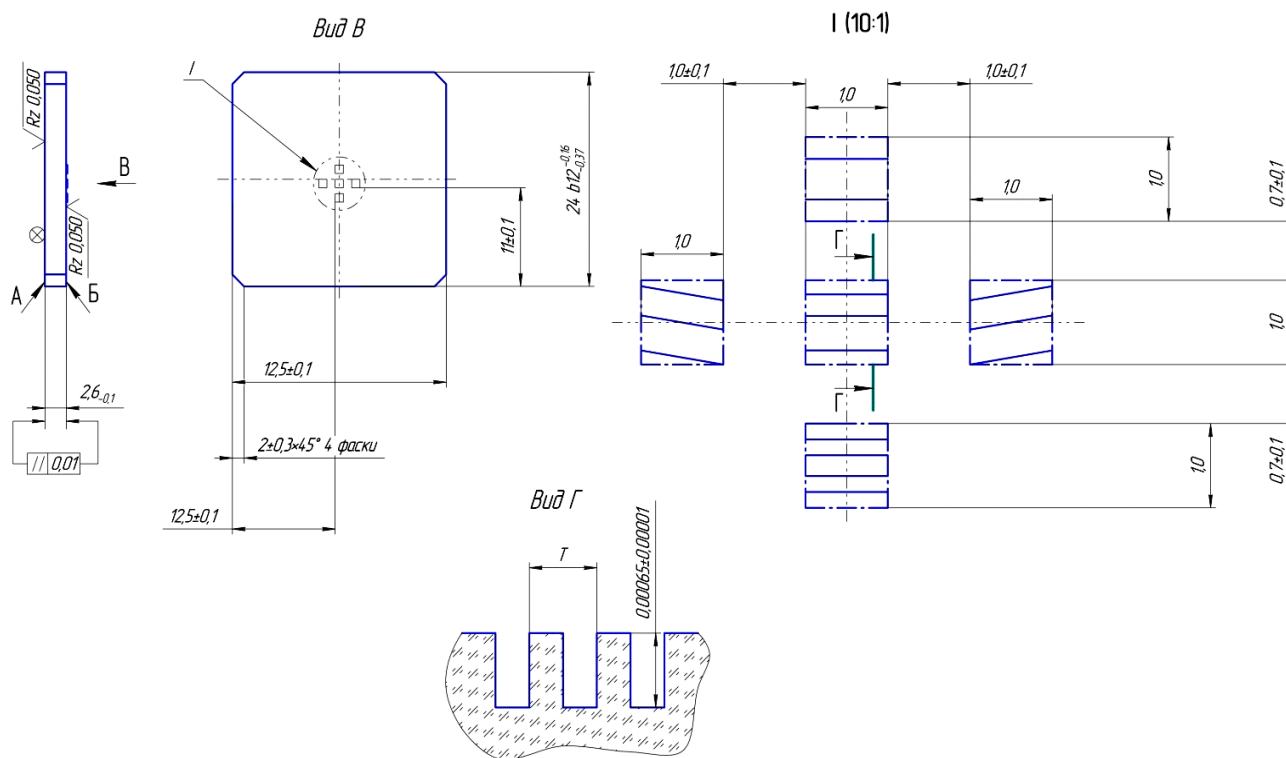


Рис. 4. Конструкция ДОЭ

Конструктивно ДОЭ, имеет три дифракционные решётки, расположенные друг под другом по вертикали, содержат горизонтальные линии дифракционных решёток. При этом периоды дифракционных решёток различны и выбраны с таким расчётом, чтобы дифрагированные лучи пересеклись в одной точке в центре зрачка. Через эту же точку должны пройти и два дифрагированных луча, прошедших через две боковые дифракционные решётки ДОЭ. Это

достигается наклонным, направленным навстречу друг другу расположением линий в этих дифракционных решётках.

Как можно видеть из рассмотрения рис. 5, на котором представлен описанный ход лучей, создаваемый ДООЭ должен работать в ненулевом порядке спектра, т.е. его дифракционные решётки являются фактически пропускающими эшелеттами – фазовыми дифракционными решётками, обладающими способностью концентрировать дифрагированное излучение в спектре определённого (не нулевого) порядка.

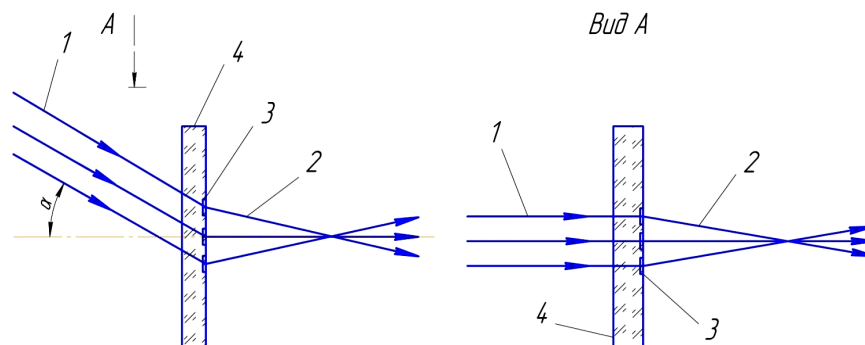


Рис. 5. Ход лучей в ДООЭ: 1 – падающие лучи; 2 – преломленные лучи; 3 – дифракционные решетки; 4 – плоско-параллельная пластина

В настоящее время известны лишь эшелетты, работающие на отражение, изготовленные нарезанием на поверхности металла специальными резцами треугольного микропрофиля, создающего дополнительную разность хода в пределах каждого периода решётки.

Пропускающие эшелетты как изделия микрооптики могут быть созданы на основе метода плазмохимического травления (ПХТ), о наличии опыта применения которого к стеклу и кварцу без уточнения деталей сообщается в работе. Дифракционные решётки методом ПХТ создавались на поверхности монокристаллического кремния, а также алмазной плёнки. Эти работы указывают на важность выбора материала маски и её толщины для обеспечения требуемых характеристик ДООЭ. Наиболее интересны для решения нашей задачи, особенность которой заключается в том, что в качестве материала ДООЭ должно быть применено щелочное стекло, результаты исследований по ПХТ кварца, приведены в работе.

Для решения нашей задачи следует исходить из того, что методом ПХТ с практической точки зрения мы сможем сформировать лишь бинарный микрорельеф, т.е. дифракционные решётки будут иметь прямоугольный микропрофиль рабочей поверхности, не характерный для эшелетта.

Рассматриваемая конструкция ДООЭ, как можно видеть из рассмотрения рис. 4, содержит просветляющее покрытие.

Фактически левая плоскость ДООЭ представляет собой фильтр, который должен обеспечивать максимальное пропускание, минимизируя тем самым коэффициент отражения, на длине волны применяемого лазера. Такие фильтры обычно представляют собой многослойные оптические покрытия, рассчитываемые с применением специальных компьютерных программ.

На рис. 6 показана спектральная характеристика такого фильтра, рассчитанного с использованием программы OptyLayer. Длина волны лазера принята равной 633 нм. Из рассмотрения рис.6 можно видеть, что удалось получить практически 100 % пропускание на центральной длине волны. Это значит, что отражения лазерных лучей от левой плоскости ДООЭ практически не будет, и вся энергия излучения пойдет на образование дифракционной картины.

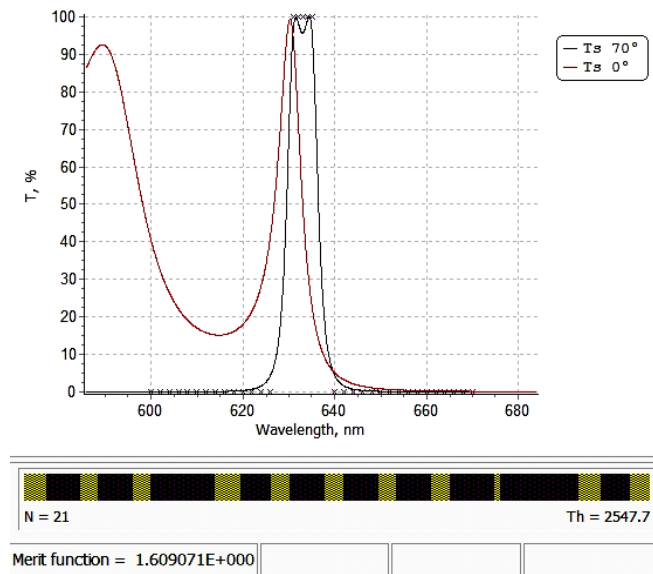


Рис. 6 . Спектральная характеристика фильтра, представляющего собой многослойное оптическое покрытие

Для сравнения на рис. 6 приведена также спектральная характеристика для света, падающего на ДОЭ ортогонально. Эта характеристика также представляет интерес, поскольку через комбинированный ГОЭ-ДОЭ должны наблюдать звездное небо, находясь на орбите. Можно видеть, что только самые красные объекты звездного неба претерпят существенное ослабление своего отображения. Это не может помешать тому, чтобы при помощи НГЭ осуществлять ориентирование спутника на орбите.

Оптическое покрытие, спектральные характеристики которого представлены на рис. 6, содержит 21 слой, каждый из которых должен быть нанесен с нанометрической точностью в условиях применения самого современного напылительного оборудования, оснащенного средствами активного контроля.

Именно это обстоятельство побуждает к созданию аналогичного фильтра, основанного на использовании плазмонного эффекта.

THE DEVELOPMENT AND MANUFACTURING OF COMBINED HOLOGRAPHIC AND DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

Sagatelan G.R.,¹ Odinokov S.B.,¹ Popov V.V.²

(¹ MSTU. N.E. Bauman, Moscow;

² MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow)

An option of improvement of a navigational optical device – the non- unstable geometric pattern – is considered. Passing through the developed HOE-DOE, each of the laser beams diffracts on its own direction and passing through the lens falls on the CCD, forming the desired picture, made up of five reliance points.

To do this, on the one side of the plane-parallel optical plate the set of five relief-phase diffraction gratings is made. On the other side of the plate the multilayer coating is deposited, which represents the optical filter operating at the wavelength of the used laser.

УСТРОЙСТВО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ЗНАКО-СИМВОЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ

Злоказов Е.Ю.,^{1,2} Стариков С.Н.,¹ Одинокоев С.Б.,² Бетин А.Ю.,² Бобринёв В.И.,²
Ковалёв М.С.,² Соломашенко А.Б.²

(¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;*

² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*)

Аннотация

В работе представлены два варианта схем оптического устройства визуализации осесимметричной знако-символьной информации использующей компьютерно-синтезированные голограммы Фурье, реализованные на голографическом носителе в проекционной схеме записи.

Введение

Проблема оптического ввода знако-символьной информации в поле зрения оператора с сохранением обзора внешней сцены, так называемая дополненная реальность, вызывает высокий интерес разработчиков последние несколько десятков лет. Особый вопрос вызывают устройства визуального наведения, позволяющие осуществление привязки пространственной ориентации управляемого оборудования к элементам внешней сцены. Для обеспечения высокой точности наведения специальный символ, введённый с помощью устройства дополненной реальности в поле зрения оператора, должен сохранять свою привязку к выбранному элементу сцены независимо от внешних условий, а также от положения глаз наблюдателя.

Оптические методы визуализации, основанные на использовании голографических и дифракционных оптических элементов (ГОЭ, ДОЭ), являются одними из наиболее распространённых для применения при создании устройств дополненной реальности. Преимуществом таких устройств является высокая световая эффективность при сравнительно компактном размере оптической схемы. Среди проблем, которые необходимо решить при создании голографической системы визуализации, важное место занимают чувствительность положения восстановленного знака к длине волны излучения лазерного диода, которая в свою очередь чувствительна к изменению внешней температуры окружающей среды, а также наличие параллаксного эффекта при смещении точки наблюдения знака, что приводит к смещению знака относительно точки привязки при незначительном смещении глаза оператора. В работе представлен метод построения устройств визуализации основанный на применении компьютерно-синтезированных голограмм Фурье (КСГФ), решающий перечисленные проблемы и обладающий простой оптической схемой с возможностью компактной реализации. Также представлены две схемы реализации описанного метода и приведены результаты экспериментального моделирования этих схем.

1. Реализация центрально-симметричного знака с помощью синтезированной голограммы Фурье

Наиболее распространённые знаки, использующиеся в устройствах визуального наведения, представляют собой центрально-симметричную фигуру (круг, прямоугольник, крест, ромб и т.д.) с центральной прицельной точкой. Подобный знак может быть реализован путём восстановления голограммы Фурье, записанной в соответствии со схемой, изображённой на рис. 1, а). Половина изображения прицельного знака записывается на голограмму Фурье так,

чтобы при её восстановлении центральная точка знака совпадала с нулевым порядком, а записанное изображение половины знака вместе с его восстановленным сопряжённым образом формировали полное изображение знака (рис. 1, б).

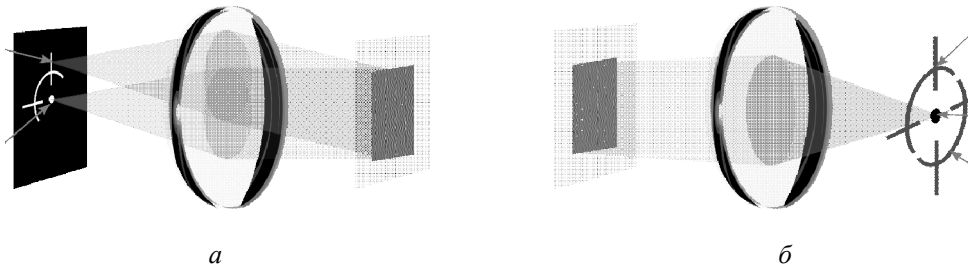


Рис. 1. Эквивалентная оптическая схема записи КСГФ центрально-симметричного знака (а); эквивалентная оптическая схема восстановления прицельного знака с помощью КСГФ (б)

Для создания голограммы Фурье может быть использован метод компьютерного синтеза и проекционной записи амплитудных голограмм Фурье, описанный в работах. В соответствии с этим методом, структура голограммы рассчитывается численно на компьютере, представляется в виде растрового изображения, выводится на экран пространственно-временного модулятора света и проецируется на голографический носитель с необходимым уменьшением. Применение фазового кодирования записываемого объекта при синтезе позволяет достичь порядка 40% дифракционной эффективности КСГФ, реализованных описанным методом.

2. Схемы устройств визуализации центрально-симметричных знаков на основе компьютерно-синтезированных голограмм Фурье

Для оптического восстановления изображения объекта закодированного на КСГФ необходима схема на основе сферической линзы, участвующей в качестве Фурье-объектива. При освещении голограммы плоским когерентным световым пучком, изображение записанного объекта и его сопряженное восстановятся в задней фокальной плоскости линзы (см. рис. 1, б). Аналогичным образом хрусталик оптической системы глаза оператора может быть использован в качестве Фурье-объектива для получения изображения знака на поверхности сетчатки. Поскольку восстановленное голограммой Фурье изображение сфокусировано на бесконечность, то при хорошей коллимации считывающего пучка это обеспечит отсутствие параллаксного эффекта при движении глаза оператора. Кроме того, незначительное изменение длины волны считывающего пучка скажется лишь на незначительном изменении масштаба восстановленного изображения, при этом центральная точка, сформированная нулевым порядком, останется на том же месте.

На рис. 2, а представлена оптическая схема устройства визуализации, позволяющая наблюдать восстановленное изображение прицельного знака в наложении на окружающую сцену. Ключевым элементом этой схемы является полупрозрачное зеркало, которое отражает лучи света, дифрагировавшие на структуре КСГФ в сторону глаза оператора не перекрывая при этом обзор внешней сцены. Существенным моментом в данной схеме является необходимость исключения переотражений светового пучка на поверхностях зеркала за счёт использования специального антиотражающего покрытия задней поверхности.

Применение планарных волноводов в сочетании с ДОО позволяет создать компактную систему визуализации дополненной реальности [1-5]. На рис. 2, б изображена схема устройства отображения прицельного знака использующая световодную стеклянную пластинку в сочетании с ДОО и ГОЕ, последний представляет собой КСГФ, реализованную с помощью ПВМС или в проекционной схеме записи на голографическом носителе. Лазера или свето-диод с ма-

лым размером излучающего тела формирует световой пучок. Сколлимированный луч дифрагирует на структуре КСГФ и вводится в планарный световод с помощью ДОЭ1, представляющий собой дифракционную решётку. Частота штрихов ДОЭ1 подбирается такой, чтобы на используемой длине волны свет, дифрагирующий в 1-ый дифракционный порядок попадал в тело световода под углом полного внутреннего отражения. ДОЭ2 с частотой линий равной частоте ДОЭ1 используется для вывода излучения в направлении глаза оператора.

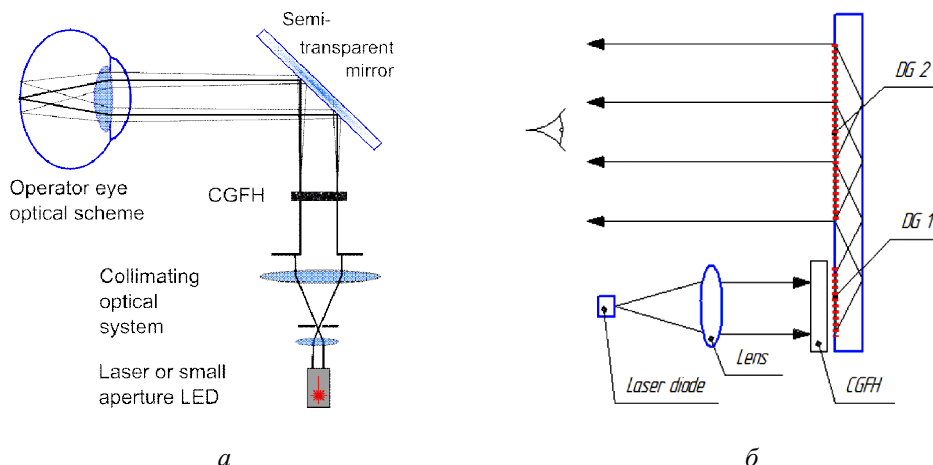


Рис. 2. Оптическая схема устройства визуализации на основе КСГФ и полу-прозрачного (а); схема устройства визуализации на основе световода, ДОЭ и КСГФ (б)

Схемы с рис. 2, а, б были исследованы экспериментально. КСГФ реализованы в проекционной схеме. Уменьшение проекционной схемы и размер записываемого знака подбирались в соответствии с требуемым размером знака при наблюдении. Качество восстановленных изображений, наблюдаемых в экспериментах, позволяет сделать вывод о высокой эффективности предложенных схем (см. рис. 3).

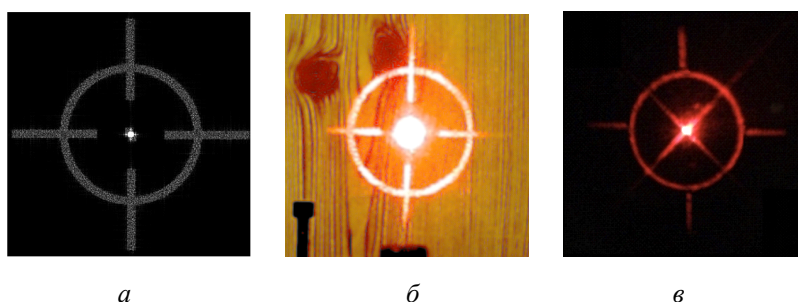


Рис. 3. Результаты численного и экспериментального исследования схем реализации устройств отображения дополненной реальности: а – результат численного восстановления прицельного знака; б – результат экспериментального восстановления прицельного знака в схеме с полу-прозрачным зеркалом (рис. 2, а); в – результат экспериментального восстановления прицельного знака в схеме с планарным волноводом в комбинации с ДОЭ

Заключение

В работе продемонстрирован метод применения КСГФ в системе отображения центрально-симметричных знаков для дисплея дополненной реальности. Представлены результаты экспериментального моделирования двух принципиальных оптических схем такого дисплея.

Работы проводились в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», проект #14.574.21.0066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Betin Yu., Bobrinev V.I., Odinson S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., and Zlokazov E.Yu.* «Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms». *Appl. Opt.* 52, 8142–8145 (2013).
2. *Eisen L., Meyklyar M., Golub M., Friesem A., Gurwisch I., Weiss V.* «Planar configuration for image projection». *Appl. Optics* 45, 4005-4011 (2006).
3. *Cameron A.* «Optical Waveguide Technology & Its Application In Head Mounted Displays». in *SPIE Proceeding*, (Vol.8383 of *SPIE Optics+Optoelectronics Proceeding Series*), pp. 83830E.
4. *Shechter R., Amitai Y., Friesem A.* «Compact beam expander with linear gratings». *Appl. Optics* 41, 1236-1240 (2012).
5. *Yan Z., Li W., Zhou Y., Kang M., Zheng Z.* «Virtual display design using waveguide hologram in conical mounting configuration». *Opt. Engineering* 50(9), 094001 (2011).
6. *Odinson S.B., Markin V.V., Kuznetsov A.S., Drozdova E.A., Solomashenko A.B.* «The optical scheme for recording of miniature light guide holographic indicator», in *SPIE Proceeding*, (Vol.8776 of *SPIE Optics+Optoelectronics Proceeding Series*), pp. 87760Q.

**THE APPARATUS OF CENTRO-SYMMETRIC SYMBOLS
VISUALIZATION BASED ON COMPUTER GENERATED FOURIER
HOLOGRAMS APPLICATION**

*Zlokazov E.Yu.,^{1,2} Starikov S.N.,¹ Odinson S.B.,² Betin A.Yu.,²
Bobrinev V.I.,² Kovalyov M.S.,² Solomashenko A.B.²*

Abstrakt

In this work we represent two variants of apparatus of centro-symmetric symbols visualization based on computer generated Fourier holograms application. The first one uses a scheme based on semi-transparent mirror, the second one uses a light guiding substrate combined with DOEs and CGH.

СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ В БИОПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦАХ ПРИ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ

Лантух Ю.Д., Летута С.Н., Пашкевич С.Н., Алиджанов Э.К.

(Оренбургский государственный университет, г. Оренбург)

Введение

Исследование физико-химических свойств комплексов органических красителей с биополимерами различной природы является важной задачей в связи с большим потенциалом использования таких систем в медицине, нанотехнологиях, молекулярной электронике, фотонике.

Молекула ДНК, являющаяся носителем генетической информации, обладает специфическими физико-химическими свойствами и рассматривается в последнее время в качестве одного из кандидатов на роль основного конструктивного элемента при создании новых материалов в нанотехнологиях.

Интерес к изучению хитозана возник благодаря комплексу уникальных физико-химических и биологических свойств этого биополимера, обуславливающих многообразие областей его применения (невирусные носители в генной терапии, биосенсоры, сорбенты и др.).

Целью работы являлось изучение комплексов катионных и анионных молекул органических красителей с ДНК (полианион) и хитозаном (поликатион) в пленочной форме и целенаправленное изменение свойств таких комплексов для создания активных сред лазеров на красителях на базе указанных материалов. Для ее достижения предложено использовать принцип самосборки по типу «снизу-вверх», реализуемый в системах краситель – биополимер.

Объекты исследования и методика эксперимента

Исследования проводили с натриевой солью высокомолекулярной ДНК и хитозаном фирмы MP Biomedicals. Красители Пиронин G и Сульфородамин B (Sigma) использовали без дополнительной очистки.

Пленки ДНК и хитозана с красителем на стеклянных подложках получали методом полива растворов биополимеров в соответствующих растворителях.

Спектры поглощения и люминесценции регистрировали на оптоволоконном спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes). Для возбуждения флуоресценции использовали DPSS YAG-Nd cw лазер KLM-532/SLN (ФТИ-Оptronик). В качестве импульсного источника возбуждения флуоресценции использовали YAG-Nd лазер LQ-129 (Солар ЛС).

Результаты и обсуждение

ДНК-краситель

Ранее нами с помощью спектроскопических методов было проведено исследование конформационного состояния ДНК в форме пленочных структур, содержащих органические красители. Было показано, что молекулы ДНК в сухих пленках при комнатной влажности воздуха (о.в. $\sim 50\%$) денатурированы. Было показано, что флуоресценция красителя в сухих пленках ДНК практически отсутствует. В то же время нами установлено, что эффект стабилизации В-формы ДНК даже при пониженных значениях о.в. среды может быть достигнут путем внесения в полимерные пленки добавок глицерина. По нашему мнению, стабилизирующее влияние добавки может быть обусловлено высокой способностью глицерина удерживать сорбционную воду. Молекулы красителя в такой системе присутствуют в виде наноразмерных оптически активных центров одного типа, которые формируются благодаря самосборке по принципу «гость-хозяин».

В настоящей работе нами исследованы флуоресцентные свойства красителя пиронина G, внедренного в матрицу ДНК в форме биополимерной пленки, стабилизированной глицерином.

На рис. 1 кривая 1 представлен спектр флуоресценции пиронина G в пленочной матрице ДНК-глицерин, полученный при лазерном возбуждении на длине волны 532 нм от DPSS YAG-Nd лазера.

Используя для накачки вторую гармонику импульсного YAG-Nd лазера ($\lambda = 532$ нм), была исследована суперлюминесценция биополимерных пленок ДНК-пиронин G-глицерин

Схема эксперимента с поперечной накачкой приведена на рис. 2.

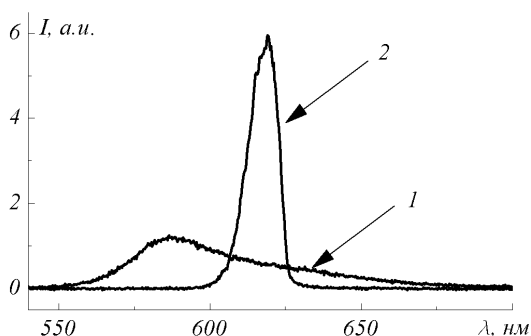


Рис. 1. Спектры флуоресценции пиронина G в матрице ДНК-глицерин, $P/D = 50$, полученные при разных условиях возбуждения. Величина сигнала для кривой 2 уменьшена в 400 раз

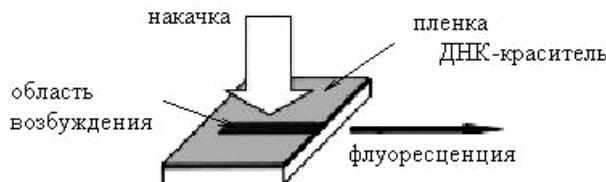


Рис. 2. Схема эксперимента по возбуждению суперлюминесценции в пленочных образцах ДНК-краситель

Пучок излучения лазера накачки фокусировался цилиндрической линзой на поверхности образца. Область возбуждения имела форму полоски шириной менее миллиметра. Энергия импульсов возбуждения $E_{\text{имп}}$ изменялась в пределах от 0,05 до 5 мДж, длительность импульсов составляла 15 нс. Флуоресценция образца снималась с торца пленки. Спектр флуоресценции красителя регистрировался после каждого импульса лазерного возбуждения при помощи волоконного спектрометра AvaSpec 2048, работающего по принципу полихроматора. При малых энергиях импульсов накачки ($\sim 0,1$ мДж) спектр флуоресценции практически совпадает со спектром, полученным при возбуждении непрерывными лазерами (кривая 1 на рис. 1). По мере увеличения энергии импульсов возбуждения происходило возрастание интенсивности флуоресценции, а, начиная с некоторого значения, оно принимало нелинейный характер. При этом

наблюдалось сужение спектра люминесценции и ее индикатрисы. Пример регистрируемого в этом случае спектра флуоресценции пиронина G приведен на рис. 1, кривая 2 ($E_{\text{имп}} = 3$ мДж, величина сигнала уменьшена в 400 раз).

Полученный результат по нашему мнению обусловлен тем, что в полимерных пленках ДНК-пиронин G с добавкой глицерина молекулы красителя интеркалированы в двойную спираль ДНК, являются оптически активными центрами одного типа и обладают высоким выходом флуоресценции.

Хитозан-краситель

Поскольку хитозан является поликатионным полимером, то связывание анионных красителей с ним должно (в случае антикооперативного характера такого связывания) приводить к формированию комплексов мономерный краситель – хитозан с высокой плотностью упаковки красителя (методика самосборки наноструктур типа «снизу-вверх»). Люминесцентный канал дезактивации энергии электронного возбуждения (квантовый выход флуоресценции) в молекуле красителя в этом случае должен быть максимально высоким. На этом базируется идея создания пленочного активного элемента лазера на красителях.

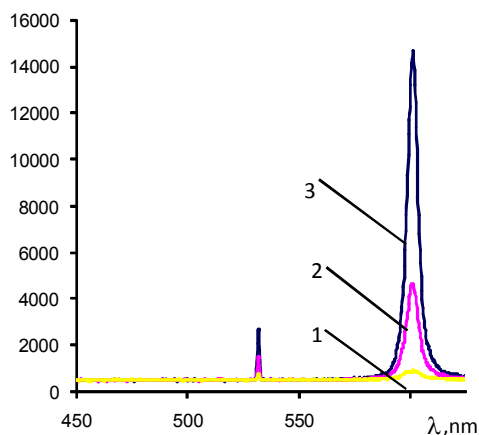


Рис. 3. Спектры суперлюминесценции пленки сульфородамин В – хитозан

На рис. 3 представлены спектры люминесценции пленочной системы сульфородамин В – хитозан при импульсном возбуждении второй гармоникой YAG –Nd лазера ($\lambda = 532$ нм) по схеме с поперечной накачкой, представленной на рис. 2. Условия эксперимента соответствуют описанию к рис. 2. Концентрация красителя в пленке составляла 8×10^{-5} моль/л.

Из рисунка видно, что по мере увеличения энергии накачки от 0,26 мДж (кривая 1) до 1,25 мДж (кривая 2) и 2,55 мДж (кривая 3) имеет место резкое нелинейное увеличение интенсивности сигнала и сужение его спектра. Также происходило сужение индикатрисы люминесцентного сигнала до нескольких мрад. Все это свидетельствует о проявлении в данной системе эффекта суперлюминесценции красителя.

Таким образом, в настоящей работе показано, что в пленочных образцах на примере систем ДНК-пиронин G-глицерин и хитозан – сульфородамин В реализуется принцип самосборки однородных супрамолекулярных структур по методике «снизу-вверх». В образцах ДНК-пиронин G-глицерин и хитозан – сульфородамин В получена суперлюминесценция красителя.

В докладе также обсуждаются эффекты, связанные с возбуждением образцов краситель-биополимер голографическими методами.

Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки РФ, ГЗ на проведение НИР № 450 от 01.02.2014 г.

SUPERLUMINESCENCE OF ORGANIC DYES IN BIOPOLYMER MATRICES DURING HOLOGRAPHIC RECORDING

Lantukh Yu.D., Pashkevich S.N., Letuta S.N., Alidzhanov E.K.

(Orenburg State University, Orenburg)

In this study the potential of creation of dye laser active media based on biopolymer matrices was investigated.

The method of production of optical uniform double-helical DNA film structures is proposed. These structures were formed according to the «guest-host» principle and the dye molecules act as the «guest» and demonstrate high fluorescence capability. Superluminescence of Pyronin G is realized in such system.

The procedure of effective luminophores based on chitosan – anion dye system manufacturing is developed and superluminescence of sulforhodamine B in chitosan film is registered.

ЕЖЕГОДНЫЙ КОНКУРС НА ПРИСУЖДЕНИЕ ПРЕМИИ ИМЕНИ Ю.И. ОСТРОВСКОГО ЗА ЛУЧШИЕ НАУЧНЫЕ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Дрейден Г.В., Андреева О.В., Семенова И.В.

*(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (ИТМО),
г. Санкт-Петербург)*

Юрий Исаевич Островский (1926 - 1992) является основоположником советской школы голографической интерферометрии. С 1961 по 1992 г. он работал в ФТИ им. Иоффе, где и были выполнены все его исследования в области голографии. Основными направлениями его работ были: голографическая диагностика плазмы, исследования гидродинамических процессов в конденсированных средах, разработка голографических методов исследования рельефа поверхностей, голографическая виброметрия, корреляционная голографическая и спекл-интерферометрия. В каждом из этих направлений им были выполнены пионерские работы, ставшие основой многих ныне широко используемых во всем мире методик голографической интерферометрии.



Ю.И. Островским было опубликовано более 250 научных статей, несколько монографий (в том числе [1-5]), которые переведены на многие иностранные языки. Под его редакцией были изданы на русском языке классические монографии Ч. Веста; Р. Кольера, К. Беркхарта, Л. Лина; М. Франсона [6-8]. Им было получено более 20 авторских свидетельств на изобретения.

Конкурс работ в области оптической голографии и интерферометрии на присуждение премии имени Ю.И. Островского проводится с 1997 г. ежегодно под эгидой Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе и Банка «Россия». К рассмотрению принимаются работы (циклы работ), выполненные на территории СНГ и опубликованные в течение 5 лет, предшествующих году проведения конкурса. Размер премиального фонда составляет 150 т.р. Присуждаются 2 премии: первая – 100 т.р., вторая – 50 т.р.

За время существования конкурса на рассмотрение конкурсной комиссии было представлено около 150 работ, были премированы 38 работ авторов, представляющих различные научные учреждения России и СНГ. Среди лауреатов конкурса были научные группы из Москвы и Санкт-Петербурга, Минска, Киева, Казани, Харькова, Иркутска, Новосибирска, Калининграда и т.д. В докладе дана информация об участниках и лауреатах конкурса за время его проведения.

В 2016 году будет проводиться юбилейный, 20-й, конкурс. Он будет приурочен к мероприятиям, посвященным памяти Ю.И. Островского, в связи с 90-летием со дня его рождения. В рамках этих мероприятий на базе ФТИ им. А.Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге планируется проведение всероссийского семинара по оптической голографии и интерферометрии.

Правила подачи работ на конкурс

Работы, включающие в себя оттиски статей, аннотацию и справку об авторах, следует присылать в 3-х экземплярах по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, секретарю комиссии по присуждению премии им. Ю.И. Островского – Г.В. Дрейден.

Срок представления работ на конкурс – 31 марта.

Дополнительную информацию о конкурсе и семинаре можно получить у ученого секретаря конкурса Г.В.Дрейден по электронной почте: galina.dreiden@mail.ioffe.ru или irina.semenova@mail.ioffe.ru, или по телефону: +7-812-2927185.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Островский Ю.И.* «Голография», Л., Наука, 1970.
2. *Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И.* «Техника и практика спектроскопии»; М., Наука, 1972.
3. *Островский Ю.И.* «Голография и ее применение», Л., Наука, 1973.
4. *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* «Голографическая интерферометрия», М., Наука, 1977.
5. *Островский Ю.И., Щетинов В.П., Яковлев В.В.* «Голографические интерференционные методы измерения деформаций», М., Наука, 1988.
6. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* «Оптическая голография», пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского, М., Мир, 1973.
7. *Вест Ч.* «Голографическая интерферометрия», пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского, М., Мир, 1982.
8. *Франсон М.* «Оптика спеклов», пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского, М., Мир, 1980.

ANNUAL COMPETITION ON YU.I. OSTROVSKY AWARD FOR ACHIEVEMENTS IN THE FIELD OF OPTICAL HOLOGRAPHY AND HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

Dreiden G.V.,¹ Andreewa O.V.,² Semenova I.V.¹

(¹ Ioffe Institute, Polytekhnicheskaya, St. Petersburg;

² ITMO University, St. Petersburg)



Yuri I. Ostrovsky (1926 - 1992) is a founder of the Soviet school of holographic interferometry. From 1961 till his death in 1992 he worked at Ioffe Physical Technical Institute in St.Petersburg where he performed all his research activities in the field of holography. The major direction of his research at Ioffe Institute was the development and application of holographic approaches for plasma diagnostics, studies of hydrodynamic processes in condensed media, investigation of surface relief, vibrometry, as well as development of the techniques of correlation holographic and speckle interferometry. His activities in each of these areas resulted in pioneering works which became the basics for many of holographic techniques and got worldwide applications nowadays.

Yu.I. Ostrovsky authored and co-authored more than 250 scientific papers and several monographs (incl. [1-5]) which were translated to various foreign languages. He was also active as an editor of Russian editions of foreign monographs in the field of optics and holography. In particular he edited monographs of Ch.West, R.Collier, K.Berkhardt, L.Lin, M.Francon [6-8] which became holography classics. He was also holding over 20 patents.

The competition of works in the field of optical holography and interferometry for the Yu.I.Ostrovsky award is being held annually starting from 1997 by Ioffe Physical Technical Institute and «Rossiya» bank. The research performed on the CIS territory and published within 5 years prior to

the competition year may be submitted. The total award amount is 150 th. RUB and is divided into two awards: the First award amounts 100 th. RUB and the Second – 50 th. RUB.

More than 150 research works were submitted during the whole time of competition existence, 38 of them have been awarded. The author teams represented research institutions from Moscow and St.Petersburg, Minsk, Kiev, Kazan, Kharkov, Irkutsk, Novosibirsk, Kaliningrad, etc. In this paper we present information on the participants and awardees during the whole time of the competition existence.

The XX-th anniversary competition will be held in 2016. It will be timed to coincide with the memorial workshop on optical holography and interferometry to be organized at Ioffe Institute in St.Petersburg and aimed to commemorate the 90-th anniversary of Yu.I. Ostrovsky.

Submission guidelines

Submissions comprising copies of papers, summary and authors' information, all in 3 copies, should be mailed to the secretary of Yu.I. Ostrovsky award competition, G.V. Dreiden, to the address: Ioffe Institute, ul. Polytekhnicheskaya, 26, 194021, St.Petersburg.

The submission deadline is March, 31.

Additional information can be requested from the competition secretary, G.V. Dreiden, by e-mail to: or irina.semenova@mail.ioffe.ru, or by phone: +7-812-2927185.

REFERENCES

1. *Ostrovsky Yu.I.* «Holography», L., Science, 1970.
2. *Zaidel A.N., Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Yu.I.* «Spectroscopy: Techniques and Practice», M., Science, 1972.
3. *Ostrovsky Yu.I.* «Holography and its Application», M., Mir, 1977.
4. *Ostrovsky Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V.* «Interferometry by Holography», Springer Ser. Opt. Sci., 20, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
5. *Ostrovsky Yu.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V.* «Holographic Interferometry in Experimental Mechanics», Springer Ser. Opt. Sci., 60, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
6. *Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H.* «Optical Holography», transl. ed. Yu.I. Ostrovsky, M., Mir, 1973.
7. *Vest C.M.* «Holographic interferometry», transl. ed. Yu.I. Ostrovsky, M., Mir, 1982.
8. *Francon M.* «Laser Speckle and Applications in Optics», transl. ed. Yu.I. Ostrovsky, M., Mir, 1980.

ЧТЕНИЯ ПАМЯТИ Ю.Н.ДЕНИСЮКА В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

Андреева О.В., Беспалов В.Г., Козлов С.А.

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), г. Санкт-Петербург)

Мероприятия, посвященные памяти основоположника объемной голографии Ю.Н.Денисюка, регулярно проводятся в Университете ИТМО, как правило, в форме конференций профессорско-преподавательского состава или студенческих конференций. Чтения впервые были проведены в 2013 году в форме докладов выдающихся ученых-голографистов, работавших с Юрием Николаевичем и сразу превратились в чтения памяти Ю.Н.Денисюка. Чтения проводились в помещении Красного домика (СПб, Кадетская линия, д. 3, корп. 2), где располагался отдел голографии Государственного оптического института им. С.И.Вавилова, который возглавлял Ю.Н.Денисюк. Аудиторию слушателей (более 80-ти человек) составляли студенты, аспиранты и молодые ученые факультета Фотоники и Оптикоинформатики и других факультетов НИУ ИТМО. Каждое мероприятие вызывало большой интерес у молодежи, о чем свидетельствуют отзывы участников. Доклады 2013 г.: *Турухано Никулина, Турухано Б.Г.* «Синтез апертуры интерференционного поля. Голографические линейные и угловые наноизмерительные системы»; *Шевцов М.К.* «Изобразительная голография: возможности и перспективы». Доклады 2014 г.: *Акаев А.А.* «О возможности повышения эффективности моделирования человеческого мозга с использованием цифровых компьютерных голограмм»; *Ганжерли Н.М.* «Малогабаритная голографическая аппаратура для работы на космических станциях». Руководство Университета ИТМО предполагает проведение таких мероприятий ежегодно. В докладе будут приведены: краткая аннотация выступлений, фотографии мероприятий и отзывы слушателей.



READING FROM ACADEMICIAN YURY NIKOLAEVICH DENISYUK AT THE ITMO UNIVERSITY

Andreeva O., Bepalov V., Kozlov S.

(St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics, and Optics, 49 Kronverksky ave., St. Petersburg)

Information is provided on the events in memory of Yu.N. Denisyuk, which are held by the ITMO University in the form of annual Readings

УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ САМОПРОЯВЛЯЮЩИХСЯ РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ДИХРОМИРОВАННОГО ЖЕЛАТИНА

Малов А.Н., Неупокоева А.В.

(Иркутский государственный медицинский институт, г. Иркутск)

Вопросы управления светочувствительностью голографических сред приобретают новую актуальность в связи с появлением большого количества доступных полупроводниковых источников лазерного излучения, обеспечивающих генерацию излучения в широком диапазоне длин волн и имеющих выходную мощность на 2-3 порядка выше гелий-неоновых лазеров, традиционно используемых для записи голограмм [1]. В связи с этим возникает вопрос оптимизации как режима записи (по длительности и интенсивности воздействия), так и состава голографических регистрирующих сред.

В данной работе в качестве управляемой системы рассматриваются гель-коллоидные самопроявляющиеся регистрирующие среды для записи голограмм. В зависимости от назначения голограммы, пространственного периода записываемой структуры, кратности записи и других факторов, голографические среды должны обладать теми или иными свойствами или особенностями. И хотя основные компоненты гель-коллоидных регистрирующих сред – желатин, соли хрома, пластификатор и вода – остаются неизменными, их соотношение, толщина слоя, технология приготовления в значительной степени влияют на конечные свойства голографического слоя.

Существенную роль в формировании свойств регистрирующей среды играет вода. Так эффект «самопроявления» стал возможен только при влагосодержании слоя около 50-70%, что достигается путем введения пластификатора и ламинированием голографического регистрирующего слоя. Механизм записи голограмм в самопроявляющихся слоях дихромированного желатина (по современным представлениям) реализуется следующим образом. Под действием света и при участии красителя происходит перенос фотоэлектрона от молекулы желатина, являющейся электронным донором, к иону хрома, который меняет зарядовое состояние, вызывая при этом расплетание спиральных участков вторичной структуры макромолекулы желатина – так называемый переход «спираль – клубок». Ионы «хром 3+» способны образовывать очень прочные химические мостичные связи, сшивая расплетенные участки макромолекул желатина. Изменение структуры экспонированных участков приводит к изменению их показателя преломления, т.е. информация в слое дихромированного желатина записывается в виде модуляции его физических свойств.

Так как молекулы желатина имеют полярные группы, то в водном растворе желатина, вода образует кластерную структуру, создавая вокруг макромолекул желатина многоярусную гидратную оболочку, так, что макромолекула оказывается как бы вплетенной в общую водородную сетку. При этом нужно учитывать, что регулярная вторичная структура белковых молекул в воде находится на грани стабильности [3], т.е. энергетически и энтропийно одинаково выгодно использовать возможные водородные связи внутри молекулы для поддержания вторичной структуры или занять эти связи молекулами воды.

Экспериментально было выявлено, что полное пропускание слоя самопроявляющегося дихромированного желатина (СПДЖ), определяемое поглощением света в слое, практически не зависит от времени экспозиции, тогда как пропускание в коллимированной компоненте, связанное с рассеянием, зависит от времени экспозиции и отражает динамику фотохимических и структурных превращений в слое. Поэтому экспериментально измерялась зависимость пропускания в коллимированной компоненте.

Анализ кинетики коллимированного коэффициента пропускания в зависимости от интенсивности выявляет следующую закономерность (рис. 1). Для эмульсии без глицерина длительность горизонтального участка возрастает с уменьшением интенсивности, однако плотность энергии экспозиции, соответствующая концу горизонтального участка остается неизменной и составляет 7-9 Дж/см². Эту энергию можно считать пороговой плотностью энергии для 10% желатинового слоя толщиной 4 мм.

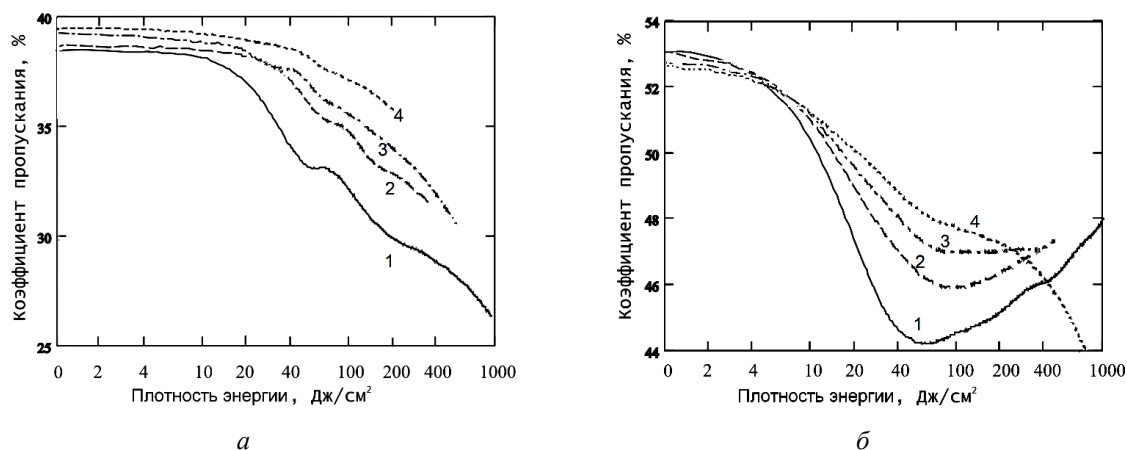


Рис. 1. Экспериментальный график зависимости коллимированного коэффициента пропускания от интенсивности для 10% эмульсии толщиной 4 мм без глицерина (*а*) и для 10% эмульсии толщиной 2 мм с добавлением глицерина 100% по массе сухого желатина (*б*) с различными интенсивностями: 1 – интенсивность 500 мВт/см² (условно 100%); 2 – интенсивность 375 мВт/см² (75%); 3 – интенсивность 250 мВт/см² (50%), 4 – интенсивность 150 мВт/см² (30%)

Для эмульсии с глицерином кинетика коллимированного коэффициента пропускания в зависимости от интенсивности изменяется следующим образом. Длительность горизонтального участка растет с уменьшением интенсивности, однако плотность энергии экспозиции, соответствующая концу горизонтального участка, изменяется слабо и составляет 1,6-2,7 Дж/см². Очевидно, пороговая плотность энергии для 10% желатинового слоя с глицерином в 3-4 раза меньше пороговой плотности энергии соответствующей эмульсии без глицерина, хотя толщина отличается только в 2 раза (4 мм для безглицеринового слоя и 2 мм для глицеринового слоя).

Аналогичное поведение наблюдается и для слоев ДЖ с добавлением в качестве пластификатора изопропилового спирта (ИПС) (рис. 2). Однако светочувствительность слоев при добавлении ИПС возрастает в несколько раз по сравнению со слоями без добавок. Причем, для каждой концентрации желатина существует своя оптимальная концентрация ИПС. Для 3% желатиновой эмульсии оптимальной концентрацией является 5% ИПС (по объему эмульсии). Увеличение концентрации ИПС приводит не только к ухудшению характеристик слоя, но и вызывает конденсацию ИПС в виде отдельных пузырьков. Для 10% ДЖ эмульсии увеличение концентрации ИПС до 10 объемных процентов, наоборот, увеличивает чувствительность слоя при сохранении однородности эмульсии.

Очевидно, что присутствие пластификатора изменяет состояние гидратной оболочки [4]. Предположим, что глицерин или ИПС способны конкурировать с молекулами желатина за право связывания на себя молекул воды. Тогда, если без пластификатора большая часть была связана с молекулами желатина, то в присутствии полярного пластификатора, вода связывается с ним, и хотя бы некоторая часть молекул желатина остается без гидратной оболочки. Т.к. гидратная оболочка стабилизирует структуру молекулы желатина [6], то отсутствие оболочки облегчает конформационные переходы в желатиновой макромолекуле, что влечет за собой увеличение скорости реакции.

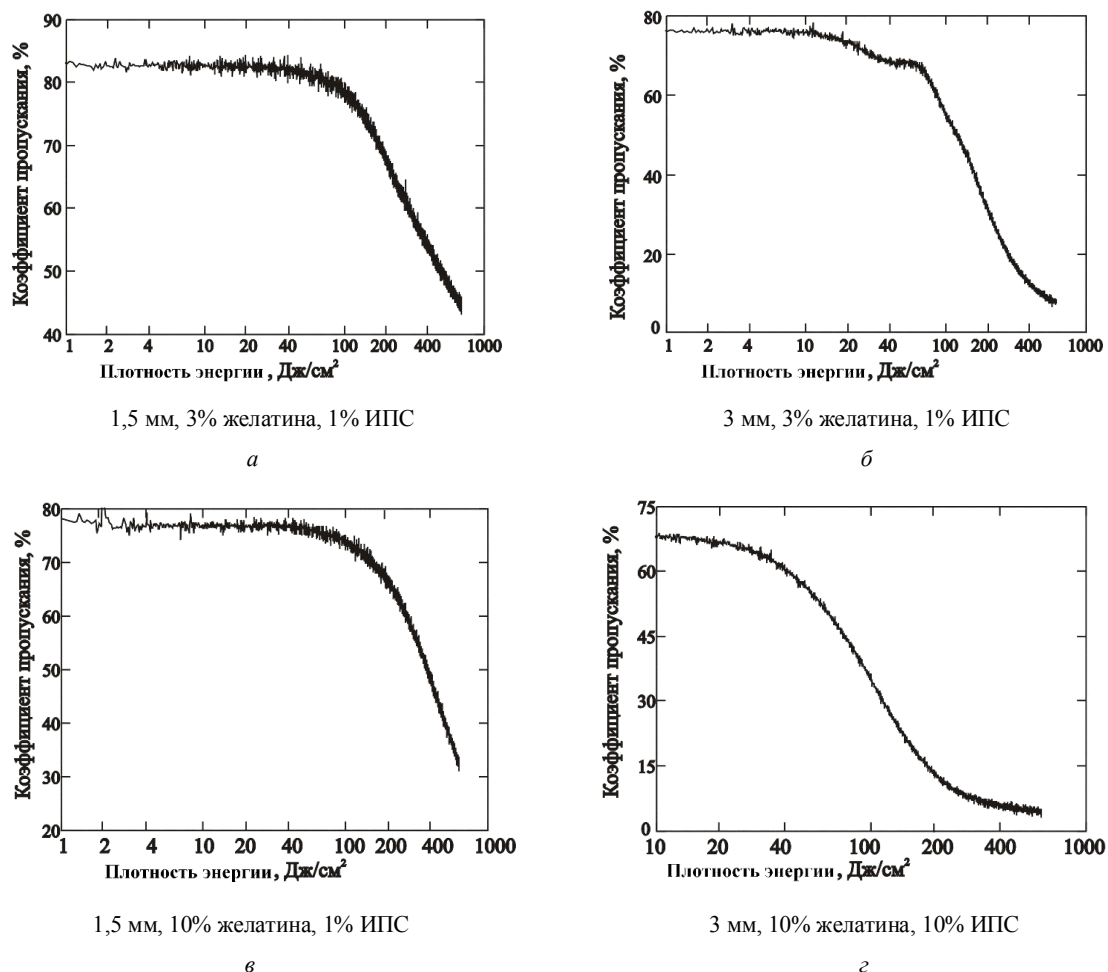


Рис. 2. Кинетика коллимированного коэффициента пропускания в зависимости от состава и толщины слоя

Для проверки этой гипотезы рассмотрим соотношение компонентов эмульсии на молекулярном уровне. Если учесть литературные данные по вторичной структуре желатина и считать, что вся поверхность его макромолекулы покрыта гидратной оболочкой, то около 3000 молекул воды находятся в связанном состоянии. Это составляет порядка 1,7% от всех молекул воды, приходящихся на одну молекулу желатина.

Если принять, что одна молекула глицерина может связывать 3 молекулы воды (т.к. глицерин – трехатомный спирт), то 1000 молекул глицерина, приходящихся на 1 молекулу желатина, свяжут 3000 молекул воды, что составит еще 1,7% от всех молекул воды, приходящихся на одну молекулу желатина.

Для 10% желатиновой эмульсии процент связанных молекул воды составляет 5,4% для эмульсии без глицерина и около 11% для эмульсии с глицерином.

Из приведенных расчетов видно, что в желатиновой эмульсии СПДЖ почти вся вода находится в свободном состоянии и поэтому введение пластификатора не может нарушать гидратную оболочку молекул желатина по механизму конкуренции за водородные связи с молекулами воды.

Но существует и другая возможность влияния на гидратную оболочку. Устойчивость гидратных оболочек ограничена: при нагревании или под влиянием других растворимых веществ кластероподобный порядок сменяется характерным для жидкой воды ближним порядком, унаследованным от структуры льда [2,4,5]. Поскольку устойчивость оболочек зависит от присутствия в растворе, кроме основного гидратируемого вещества (желатина), других веществ, то присутствие пластификаторов может смещать границы устойчивости.

Экспериментальные данные показывают, что, несмотря на неопределенность механизма, сам факт влияния многоатомных спиртов на временные параметры фотохимической реакции не оставляет сомнений. Причем добавление глицерина снижает пороговую плотность энергии реакции и увеличивает ее скорость, но практически не влияет на чувствительность эмульсионного слоя. Добавление ИПС, напротив, увеличивает порог реакции, но вместе с тем повышает ее скорость в целом и увеличивает чувствительность слоя в 2-4 раза.

Если же давать оценку светочувствительности желатинового слоя с точки зрения пороговой энергии, то нужно учесть, что в наших экспериментах лазерный пучок не расширился и лазерное излучение взаимодействовало с эмульсией объемом около $3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$. Для безглицериновых эмульсий порог реакции составляет около 10 Дж/см^2 или около 10^{-15} Дж (около 6 кэВ) на одну молекулу метиленового голубого. Для эмульсии с добавлением глицерина этот порог снижается вдвое, а добавление ИПС практически не влияет на порог реакции. Если же считать энергию, приходящуюся на один хромсодержащий ион, то получим величину на 3 порядка меньше, т.е. около 10^{-18} Дж (или около 10 эВ).

Выводы

Исследование временных характеристик фотохимической реакции в зависимости от состава слоя показало, что добавление в ДЖ-эмульсию глицерина увеличивает скорость реакции, значительно уменьшает порог реакции и несколько увеличивает чувствительность слоя. Добавление в эмульсию изопропилового спирта не изменяет порог реакции или увеличивает его, но при этом скорость реакции в целом увеличивается в 2-4 раза, кроме того, значительно увеличивается чувствительность эмульсии.

Добавление в эмульсию многоатомных спиртов изменяет временные параметры реакции, взаимодействуя со свободной водой слоя и гидратными оболочками макромолекул желатина. Расчет показывает, что влияние добавок не связано с конкуренцией за водородные связи между молекулами желатина и молекулами спирта, т.к. связанная вода в слое без добавок составляет максимум около 5,4%, добавление глицерина или ИПС увеличивает эту цифру не более, чем вдвое.

При подборе режима записи на эмульсиях СПДЖ нужно учитывать, что светочувствительность слоя определяется как содержанием ионов хрома, так и концентрацией метиленового голубого (в случае записи излучением красной области спектра). При этом в качестве порогового параметра нужно рассматривать величину около 6 КэВ, т.к. в процессе записи участвуют около 1000 молекул метиленового голубого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Neupokoyeva A.V., Malov A.N., Borodin A.N., Malov S.N.* Kinetics of Hologram Recording on Chromated Gelatin Using the Diode-Laser Radiation // *Laser Physics*, 2009. Vol. 19. № 9. Pp. 1891 – 1896.
2. *Ошурко В.Б., Манькин Э.А.* Самоорганизация воды под действием лазерного излучения// «Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии». – Иркутск, Издательство «Папирус», 2008. – С. 92 - 99.
3. *Финкельштейн А.В., Птицын О.Б.* Физика белка. – М.: Книжный дом «Университет», 2002. – 376 с.
4. *Лакно В.Д.* Кластеры в физике, химии, биологии. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 256 с.
5. *Вода: структура, состояние, сольватация.* / Отв. ред. А.М. Кутепов. – М.: Наука, 2003. – 404 с.

6. Компьютеры и суперкомпьютеры в биологии. / Под ред. В.Д. Лахно и М.Н. Устинина. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 258 с.

SELF-RECORDING MEDIA ON THE BASIS OF DICHROMATED GELATIN PHOTOSENSITIVE PROPERTIES CONTROL

Malov A.N., Neupokoeva A.V.
(Irkutsk state medical university)

The sensitivity of the holographic media based on dichromated gelatin and the ability to control of their properties through the introduction of plasticizers are considered. It is shown that the glycerol addition to gelatin holographic emulsion increases the reaction rate, reduces the threshold of the reaction and increases the sensitivity of the layer. Isopropanol adding to the emulsion does not change the reaction threshold or increases it, but under this condition the emulsion sensitivity is significantly improved. Also, the mechanism of the plasticizers influence on the gelatin emulsion properties and the water role in improving process are discussed. Presents the calculation of the threshold energy of recording that is associated with the concentration of chromium ions or of molecule of methylene blue. For emulsions without glycerol reaction threshold is about 10 J/cm^2 or about 10^{-15} J (about 6 keV) per one methylene blue molecule and about 10^{-18} J (about 10 eV) per chromium ion.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ БИ-ФОКАЛЬНЫХ ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ ХРУСТАЛИКОВ ГЛАЗА МИОЛ-АККОРД

Ленкова Г.А.

*(Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск)*

МИОЛ-Аккорд – дифракционно-рефракционный хрусталик глаза (интраокулярная линза ИОЛ), который разработан в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск), изготавливается на научно-производственном предприятии «Репер-НН» (г. Нижний Новгород) и имплантируется в Новосибирском филиале ФГУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова» [1]. Дифракционная структура МИОЛ-Аккорд формируется так, чтобы можно было видеть без очков вдаль и вблизи (два фокуса, рис. 1). Кроме того предусматривается компенсация aberrаций глаза (роговицы, стекловидного тела) и рефракционной части МИОЛ-Аккорд для повышения разрешающей способности при ближнем зрении. Методы контроля оптической силы (рефракции) ИОЛ, рекомендуемые в ГОСТ и ТУ, не учитывают специфические особенности МИОЛ-Аккорд. Цель работы – анализ недостатков известных методов контроля оптической силы рефракционных и дифракционно-рефракционных ИОЛ, компьютерное моделирование процесса измерения фокусных расстояний, на основе которых рассчитывается рефракция ИОЛ, рассмотрение возможных методов контроля рефракции МИОЛ-Аккорд с учётом особенностей их дифракционной структуры.

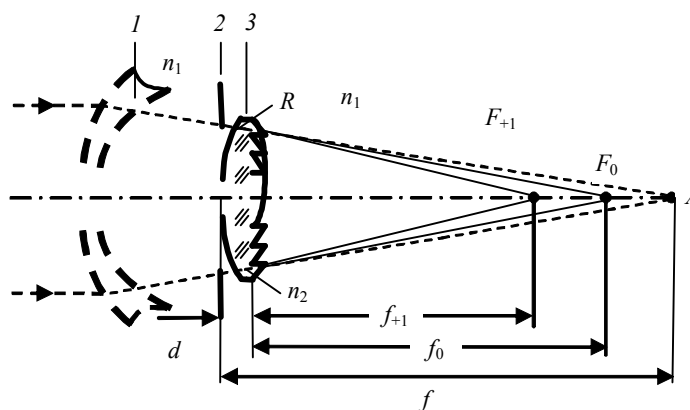


Рис. 1. 1 – роговица глаза; 2 – зрачок (диафрагма); 3 – МИОЛ-Аккорд

В соответствии с ГОСТ значение вершинной рефракции ИОЛ определяется по формулам геометрической оптики на основе оптических параметров линзы (1-й метод) или фокусного расстояния в воздухе, которое измеряется как расстояние от линзы до изображения шкалы (2-й метод) или рассчитывается на основе размера изображения шкалы (3-й метод). Шкала располагается в фокусе объектива. На предприятии «Репер-НН» используется видоизменённый 2-й метод с установкой ИОЛ вместо микрообъектива микроскопа. Шкала закрепляется на фиксированном расстоянии от фокальной плоскости окуляра, ИОЛ перемещается до чёткого изображения шкалы и измеряется расстояние от неё до шкалы. Наиболее удобным является видоизменённый 2-й метод с лазерным источником света, применяемый разработчиками линзы МИОЛ-Аккорд [2], так как он не требует аттестованной шкалы, а при измерениях с кюветой, имитирующей измерения внутри глаза, не требует знания показателей преломления.

Контроль рефракции дифракционно-рефракционных ИОЛ имеет некоторые особенности из-за наличия дифракционного компонента. Микроструктура дифракционного компонента рассчитывается для среды глаза и таким образом, чтобы свет в основном направлялся в 0-й (зрение вдаль) и +1-й (зрение вблизи) порядки дифракции. Но в условиях воздуха фазовая задержка увеличивается, и свет направляется преимущественно в +1-й и +2-й порядки дифракции, а 0-й практически отсутствует.

Определение рефракций ИОЛ для дальнего $\Phi_{0,aq}$ и ближнего $\Phi_{1,aq}$ зрения в среде (внутри глаза) по рефракциям $\Phi_{0,air}$ и $\Phi_{1,air}$ в воздухе возможно двумя способами. 1-й способ основан на использовании фокусного расстояния $f_{1,air}$, измеренного в воздухе в +1-м порядке, и расчетного значения оптической силы дифракционного компонента Φ_d (формулы (1) и (2)), 2-й способ – на использовании фокусных расстояний $f_{1,air}$ и $f_{2,air}$, измеренных в воздухе в +1-м и +2-м порядках (формулы (1), (3) и (4)).

$$\Phi_{1,air} = 1/f_{1,air} \quad (1)$$

$$\Phi_{0,air} = \Phi_{1,air} - \Phi_d \quad (2)$$

$$\Phi_d = 1/f_{2,air} - 1/f_{1,air} \quad (3)$$

$$\Phi_{0,air} = \Phi_{1,air} - \Phi_d = 2/f_{1,air} - 1/f_{2,air} \quad (4)$$

Рефракции $\Phi_{0,aq}$ и $\Phi_{1,aq}$ рассчитываются по формулам (5) на основе полученных значений $\Phi_{0,air}$ и $\Phi_{1,air}$ и переводного коэффициента $Q = (n_{IOL} - n_{aq}) / (n_{IOL} - 1)$, зависящего от коэффициентов преломления среды n_{aq} и материала ИОЛ n_{IOL} :

$$\Phi_{0,aq} = Q\Phi_{0,air}, \quad \Phi_{1,aq} = Q\Phi_{1,air} \quad (5)$$

3-й способ – непосредственное определение рефракций $\Phi_{0,aq}$ и $\Phi_{1,aq}$ при помещении ИОЛ в кювету. Рефракция рассчитывается просто, как величина, обратная фокусным расстояниям $f_{0,cuv}$ и $f_{1,cuv}$, измеренным за кюветой в 0-м и +1-м порядках дифракции:

$$\Phi_{0,aq} = n_{aq}/f_{0,aq} = 1/f_{0,cuv} = \Phi_{0,cuv}, \quad (6)$$

$$\Phi_{1,aq} = n_{aq}/f_{1,aq} = 1/f_{1,cuv} = \Phi_{1,cuv}. \quad (7)$$

При исследованиях линзы МИОЛ-Аккорд возникают затруднения в связи с тем, что структура её дифракционного компонента предусматривает компенсацию сферических аберраций внутри глаза. В воздухе условия компенсации нарушаются и появляются аберрации, которые особенно заметны во 2-м порядке дифракции. При измерениях в белом свете наблюдается, кроме того, зависимость аберраций от длины волны. Если в +1-м порядке хроматические аберрации дифракционного и рефракционного компонентов взаимно компенсируются, то во +2-м они наряду со сферической аберрацией будут существенно снижать контраст изоб-

ражения и затруднять измерение фокусных расстояний в этом порядке. Вероятно, надёжнее использовать 1-й путь определения рефракции, но следует учесть, что дифракционный элемент компенсирует сферические aberrации, и поэтому значение его оптической силы Φ_d будет зависеть от параметров структуры и диаметра диафрагмы, при которой проводятся измерения.

$$(k + a_0)\lambda = a_1 r^2 - a_2 r^4 - \text{уравнение дифракционной структуры МИОЛ-Аккорд.}$$

Было проведено компьютерное моделирование процесса измерения фокусных расстояний. Исследовалась зависимость Φ_d от коэффициента a_0 , характеризующего фазовый сдвиг и уменьшение радиуса центральной зоны, aberrационного коэффициента a_2 и радиуса диафрагмы r_d . Определено, что значение Φ_d совпадает с номинальным значением 4,2 дптр при $a_0 = 0$, $a_2 = 0$ и $r_d = 1,5$ мм. Показано, что невозможно однозначно определить положение фокусов при $r_d = 0,5$ мм из-за расширения и переналожения функций распределения интенсивности в порядках и при r_d больше 1,5 мм из-за aberrаций (рис. 2).

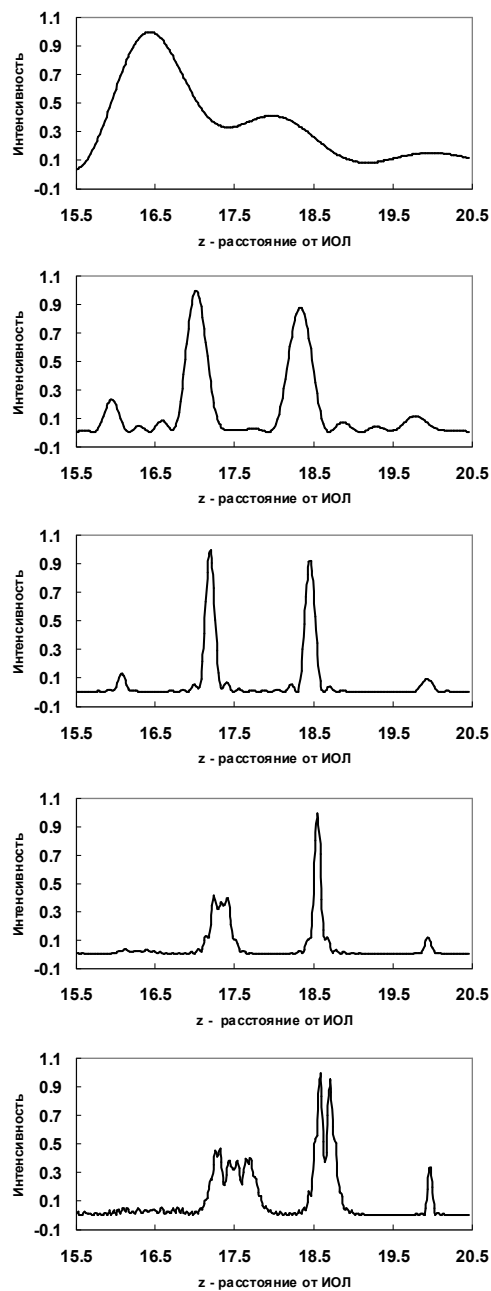


Рис. 2. МИОЛ-Аккорд в воздухе: $a_0 = 0,24$, $a_2 = 0,0000543$, $r_d = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ мм (сверху вниз)

Лучшие условия для измерений соответствуют диафрагме с радиусом 1,5 мм, когда наблюдаются минимальные искажения в распределении интенсивности и порядки дифракции (фокуса) чётко разделяются. Но в этом случае при наличии фазового сдвига и абберационного коэффициента $\Phi_d = 3,96$ дптр. Если вместо этого значения использовать номинальное $\Phi_d = 4,2$ дптр, которое больше на 0,24 дптр, то в расчёте рефракции возникнет ошибка, равная 0,1 дптр.

Для области рефракций ИОЛ от 10 до 30 дптр рассчитаны поправки, которые необходимо вводить в значения измеренных фокусных расстояний для определения оптической силы (рефракции) ИОЛ с высокой точностью (0,1 дптр). Значения поправок для среды (с кюветой) и воздуха следующие: $-(0,59 \div 1,06)$ и $-(0,44 \div 0,80)$ мм – на толщину линзы; $-(0,08 \div 0,23)$ и $-(0,02 \div 0,06)$ мм – на сферическую абберацию; $\pm (1,21 \div 0,13)$ и $\pm (0,11 \div 0,01)$ мм – на глубину фокуса. Необходимо вводить также поправку на оптическую силу диафрагмы, которая фактически равна самой силе и при радиусе диафрагмы 1,5 мм составляет $-0,24$ дптр. Показано, что точность коэффициента перевода результатов измерения в воздухе в условия среды глаза должна составлять 0,0016, показателей преломления $\sim 0,0005$, а фокусных расстояний при измерении в воздухе 0,01-0,05 мм и в среде (за кюветой) 0,1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленкова Г.А., Корольков В.П., Коронкевич В.П. и др. //Автометрия. 2008. 44. № 4. С. 75-88.
2. Ленкова Г.А. Автометрия. 2007. 43, № 3. С. 85-99.

FEATURES OF MEASUREMENT OF OPTICAL POWER THE BIFOCAL DIFFRACTIVE- REFRACTIVE CRYSTALLINE LENSES MIOL-AKKORD

Lenkova G.A.

(Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of RAS)

MIOL-Akkord – the diffractive-refractive artificial crystalline lens of eye (intraocular lens IOL) developed at Institute of Automation and Elektrometriy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science (Novosibirsk) and made at the scientific and production enterprise «Reper-NN» (Nizhny Novgorod). Diffraction structure of MIOL-Akkord is formed so that it was possible to see without glasses into the distance and near. The most important characteristic of IOL is the optical power which in ophthalmology is called as refraction. The control methods of the refraction of IOL recommended in Standard and TU don't consider specific features MIOL-Akkord.

The microstructure of a diffraction component is calculated for aqueous humour of eye and so that light generally went in 0 (distant sight) and the +1st (near sight) focus (diffraction orders). But in the conditions of air in which carry out control of a refraction of IOL, the phase delay on structure increases, and light goes to the +1st and +2nd focus, and 0 is practically absent. Compensation of aberrations of an eye is provided in the diffraction MIOL-Akkord component in addition. In air compensation is broken.

The analysis of control methods of refraction of IOL is carried out. On the basis of computer modeling dependence of real optical power of a diffraction component on the radius of a diaphragm, aberrational coefficient and reduction of radius of the central zone is investigated. It is shown that the best conditions (the minimum distortions in intensity distribution) for measurements of focal lengths correspond to a diaphragm with a radius of 1,5 mm. Values of corrections for area of refractions of IOL from 10 to 30 дптр are calculated.

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЧЕБНОГО НАБОРА ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

Апрелев Ю.И., Миндубаев А.Р.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

В развитие научно-исследовательской работы по созданию учебно-методического лабораторного комплекса «Основы дифракционной оптики и голографии», выполненной совместно специалистами ОАО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (ОАО «НПО ГИПО») и Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ в рамках Государственного контракта №02.740.11.0557 [1], в ОАО «НПО ГИПО» разработан и изготовлен компактный учебный лазерно-голографический стенд на основе использования набора оригинальных голограммных оптических элементов.

В докладе приводятся состав и основные технические характеристики этого стенда и перечень выполняемых на нём лабораторных работ для студентов оптических направлений подготовки.

В качестве практического примера описана лабораторная работа по изучению свойств лазерного интерферометра, построенного на основе двух пропускающих голограммных дифракционных решёток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы дифракционной оптики и голографии: Учебное пособие / И.Г. Вендеревская, А.В. Лукин, А.Н. Мельников и др. / Под ред. Н.К. Павлычевой. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. 188 с.

DEMONSTRATION FEATURES OF EDUCATIONAL SET OF HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENTS FOR STUDENTS OF OPTICAL TRAINING DIRECTIONS

Aprelev Yu.I., Mindubaev A.R.

*(OJSC «Scientific and Production Association
«State Institute of Applied Optics», Kazan)*

By developing research work on creation of the educational and methodical laboratory complex «Basics of diffraction optics and holography», which is made jointly by OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics» (OJSC «NPO GIPO») and Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI under the State Contract No. 02.740.11.0557, a compact educational laser and holographic stand is designed and manufactured by OJSC «NPO GIPO». This stand is based on a set of original holographic optical elements.

The paper presents the composition and main technical characteristics of this stand and a list of laboratory works carried by said stand for students of optical training directions.

As a practical example the paper describes the laboratory work on studying the properties of a laser interferometer, built on the basis of two transmission hologram diffraction gratings.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧЕЧНЫХ ДИАФРАГМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЕ

Коренной К.С.,^{1,2} Белокопытов А.А.,¹ Максакова Л.А.¹

(¹ ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань;
² КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань)

Голографические дифракционные решётки получаются как результат регистрации высокоразрешающим светочувствительным материалом картины интерференции двух когерентных плоских или сферических волн. Для записи таких решёток используют постоянное лазерное излучение для создания когерентной волны, оптику (зеркала, светоделитель) – для создания интерференционной картины и точечную диафрагму – «пинхол» – для пространственной фильтрации. При создании крупногабаритных решёток нужно учитывать, что энергия излучения будет распределяться по большой площади поверхности подложки. Поэтому для того, чтобы интерференционная картина записалась на фоточувствительный слой, необходимо, чтобы плотность мощности излучения в каждой точке была выше пороговой чувствительности слоя. Для этого подбирается оптимальная мощность лазера, однако оптические компоненты, используемые в схеме записи – зеркала, светоделитель, пинхол, – имеют разную лучевую стойкость. Если мощность лазерного излучения выше пороговой лучевой стойкости этих элементов, то со временем они начинают разрушаться. Очевидно, что оценка эксплуатационных характеристик оптических элементов, используемых для записи дифракционных решёток при мощном лазерном излучении, является актуальной задачей.

На рис. 1 представлен ход луча через объектив и пинхол.

Для голографии, в зависимости от длины волны лазера и площади записываемой подложки, диаметр пинхола лежит в диапазоне 10 – 15 мкм.

Для записи дифракционной решётки была рассчитана оптическая схема, часть которой показана на рис. 2.

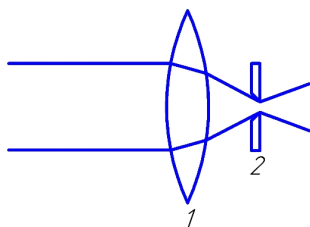


Рис. 1. Прохождение лазерного луча через объектив и пинхол: 1 – объектив, 2 – пинхол

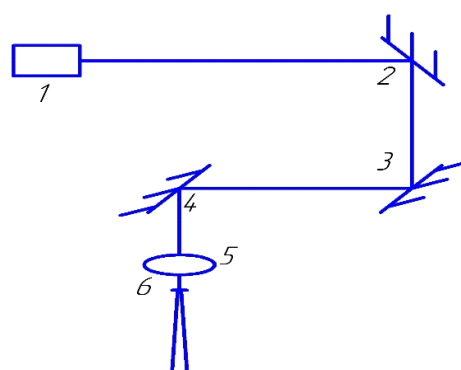


Рис. 2. Ход лазерного луча в оптической схеме для записи дифракционной решётки: 1 – лазер; 2, 3, 4 – зеркала; 5 – объектив; 6 – пинхол

При расчёте пропускания оптической системы необходимо учитывать отражение и поглощение энергии оптическими элементами. Зеркала подбираются таким образом, чтобы их коэффициент отражения для рабочей длины волны был максимальным.

Луч падает по нормали к объективу, поэтому для отражения в однолинзовом объективе формула Френеля примет вид:

$$R = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2, \quad (1)$$

де R – коэффициент отражения; n', n – показатели преломления второй и первой среды.

Поглощение в объективе будет описываться законом Ламберта-Бера:

$$I = (1 - R)I_0 e^{-\alpha \delta_s}, \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность падающего на объектив лазерного излучения; α – коэффициент поглощения; δ_s – толщина поглощаемого слоя (скин-слоя). [1, 2]

Толщина скин-слоя определяется следующим соотношением:

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 c^2}{\sigma \omega}}, \quad (3)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ω – частота падающей волны; σ – электропроводность вещества; c – скорость света. [3]

Поглощение пинхолом излучения математически также описывается уравнением Ламберта-Бера.

Для теоретического расчета излучения, поглощаемого пинхолом, использовались следующие данные:

Источник лазерного излучения	Verdi V.12 (Coherent, США)	
Длина рабочей волны, λ , нм	532	
Начальная интенсивность лазерного излучения, I , Вт/мм ²	2,52	
Диаметр пучка, d , мм	2,25	
Зеркало	Laser Line mirrors (STANDA, Литва)	
Количество	3	
Объектив	ОМ-3 (ЛОМО, Россия)	
Материал пинхола	Алюминий	Медь
Коэффициент отражения (для рабочей длины волны), R	0,86	0,42
Электропроводность вещества, σ , (Мом/м) ⁻¹	37	57,6
Диаметр отверстия, D_1 , мкм	10	10
Коэффициент поглощения, α	0,14	0,3

Допустим, мощность лазерного излучения $P = 10 \text{ Вт}$, тогда $I = 2,52 \text{ Вт/мм}^2$.

Из формул (1 – 3) рассчитано, что на пинхол приходит излучение, интенсивность которого $I_p \approx 1,6 \text{ Вт/мм}^2$. На рис. 4 представлен профиль распределения интенсивности лазерного пучка, падающего на пинхол в зависимости от ширины пучка, рассчитанный с помощью программного обеспечения Zemax.

Было рассчитано, что на края пинхола попадает излучение, интенсивность I_p , которого составляет не более 2% от I_p , то есть не более $0,13 \text{ Вт/мм}^2$. Тогда из (2) имеем:

$$I_{\text{мед.погл.}} = 0,075 \text{ Вт/мм}^2;$$

$$I_{\text{ал.погл.}} = 0,018 \text{ Вт/мм}^2.$$

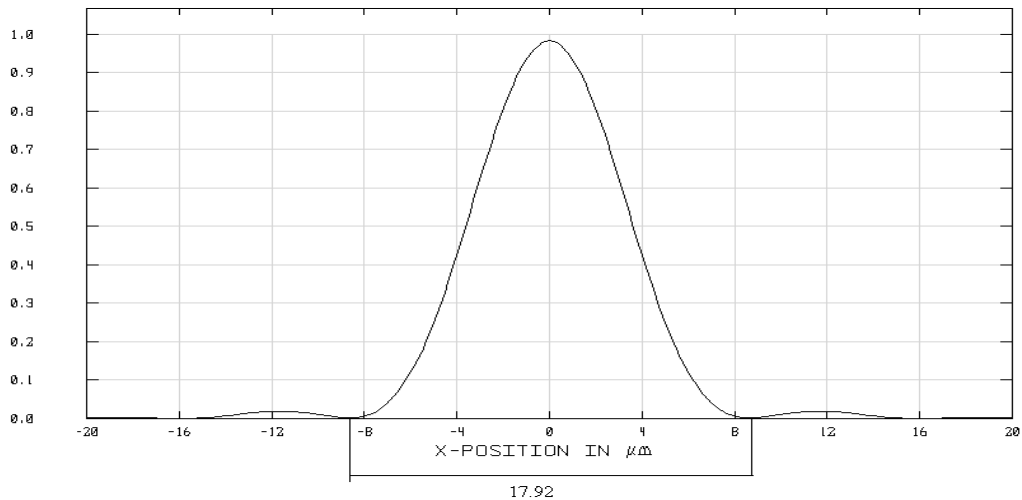


Рис. 4. Профиль распределения интенсивности лазерного пучка, падающего на пинхол

Полученные результаты говорят о том, что при прохождении лазерного излучения через пинхол, на его края падает излучение, не оказывающее воздействие на эксплуатационные характеристики точечной диафрагмы. Однако практические результаты говорят об обратном: края пинхола начинают неравномерно плавиться, приводя тем самым к потере чёткости интерференционной картины. Это связано с тем, что в расчете не учитываются:

- 1) влияние термического расширения и термического изменения показателей преломления линз на параметры объектива и изменение диаметра отверстия пинхола вследствие его нагрева и охлаждения;
- 2) погрешность при юстировке оптической схемы;
- 3) колебания всей системы;
- 4) дополнительное рассеяние и поглощение излучения, возникающее из-за запылённости рабочей комнаты.

Поэтому качество пинхолов оценивается экспериментальным путём: при рассмотрении изображения, получаемого с его помощью, а также наблюдением в оптическом микроскопе. Для повышения эксплуатационных характеристик пинхолов необходимо минимизировать влияние колебания системы, запылённости рабочей комнаты, а также более точно юстировать оптическую схему.

В ОАО «НПО ГИПО» пинхолы изготавливаются путём прокалывания иглой тонкого слоя металла толщиной от 10 до 200 мкм. После прокалывания необходимо очистить отверстие пинхола от заусенцев, чтобы избежать дифракции и рассеивания на них.

В дальнейшем планируется собрать оптическую схему и экспериментальным путём оценить эксплуатационные характеристики пинхолов из различных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Ч. I. Поглощение лазерного излучения в веществе. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 2-е изд. перераб. – М.: Наука, гл. ред. физ-мат. лит., 1982. – 496 с.
3. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т7. Физика сплошных сред. Мир ISBN., 1965. – 287 с.

OPERATIONAL PERFORMANCE EVALUATION OF PINHOLE APERTURES FOR SPATIAL FILTRATION OF POWERFUL LASER RADIATION WITH RESPECT TO THE DIFFRACTION PATTERN

Korennoy K.S.,^{1,2} Belokopytov A.A.,¹ Maksakova L.A.¹

(¹ OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia;

² KNITU-KAI named after A.N. Tupolev, Kazan)

The study covers beam damage threshold of various types of pinhole apertures that are under the action of powerful laser radiation, used for recording holographic gratings. It analyses the effect of the pinhole aperture material on their beam damage threshold. The paper proposes some ways to enhance such operational performance.

КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ОБЪЕМНО-ФАЗОВЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Лукин А.В.,¹ Белокопытов А.А.,¹ Максакова Л.А., Сидорова Т.Б.,
Саттаров Ф.А.,¹ Скочилов А.Ф.,¹ Тугаринов С.Н.,² Шигапова Н.М.¹

(¹ ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань;
² Частное учреждение «ИТЭР-Центр», г. Москва)

Для некоторых важных применений спектральных приборов требуется одновременное получение как большой светосилы прибора, так и высокой дисперсии дифрагированного излучения в широком спектральном диапазоне. При этом качество изображения, формируемого стандартными отражательными вогнутыми дифракционными решетками, оказывается недостаточным из-за неполной компенсации астигматизма и аберраций широких пучков.

В ряде случаев более оптимальными являются конструкции многоканальных спектрометров с использованием пропускающих фазовых дифракционных решеток. На рис. 1 приведена схема трехканального спектрометра с пропускающими дифракционными решетками для системы активной спектроскопии международного проекта ИТЭР.

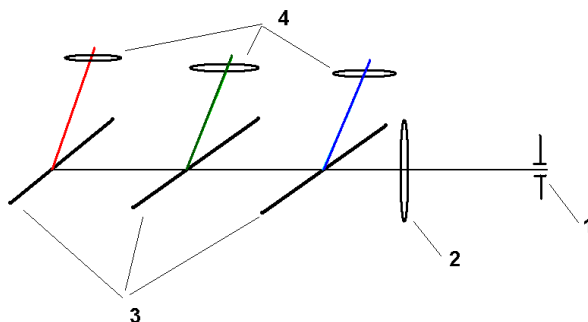


Рис. 1. Схема спектрометра с тремя прозрачными решетками: 1 – входная щель; 2 – входной (коллиматорный) объектив; 3 – прозрачные дифракционные решетки; 4 – выходные объективы

Отдельные каналы спектрометра обеспечивают изображение в спектральных диапазонах 468 ± 8 , 530 ± 8 , 656 ± 8 нм.

Использование осесимметричных коллиматоров и плоских пропускающих голограммных решеток с углами падения и дифракции 60° позволяет потенциально достичь приемлемых характеристик трехканального спектрометра.

Основными требованиями к пропускающим дифракционным решеткам в данном спектрометре являются высокая дифракционная эффективность (ДЭ) в естественном свете для рабочих длин волн, высокое пропускание для нерабочих длин волн, достижение высокого контраста изображения в ближнем и дальнем поле, приемлемое разрешение.

Были решены конструктивные и технологические проблемы получения объемно-фазовых пропускающих голограммных решеток (ПГР) с частотами 3700 , 3300 , 2650 мм^{-1} для трехканального спектрометра с использованием светочувствительных слоев на основе бихромированной желатины (БХЖ). Для оптимизации параметров ПГР использованы теория связанных волн и прикладная программа Zemax.

Изготовленные опытные образцы ПГР для трехканального спектрометра ИТЭР на слоях БХЖ имеют следующие основные технические характеристики:

Световые размеры, мм	260×130
Пространственные частоты, мм ⁻¹	3700, 3300, 2650
Дифракционная эффективность в неполяризованном свете, %	50
Пропускание для нерабочих длин волн, %, не менее	85
Ближний контраст изображения, не более	10 ⁻³
Дальний контраст изображения, не более	10 ⁻⁴

Конструктивно ПГР представляет собой оптическую склейку голограммной решетки с покровными подложками с наружными просветленными (для угла падения $\alpha = 60^\circ$) поверхностями. Расчеты показывают, что такая конструкция ПГР позволяет:

- почти полностью исключить ухудшение восстановленного волнового фронта из-за некачественных поверхностей подложки голограммы;
- повысить прозрачность ПГР для нерабочих длин волн до требуемых значений (>85%);
- минимизировать «паразитные» переотраженные пучки и таким образом улучшить «ближний контраст» изображения.

Реальные значения остаточного отражения просветленных поверхностей для угла падения 60° составляют 2,5 % для рабочих длин волн и не более 6 % – для нерабочих длин волн.

На рис. 2 приведены зависимости дифракционной эффективности ПГР η для центральной длины волны от фактора $(n_1 \times d)$, где n_1 – амплитуда модуляции показателя преломления ПГР, d – рабочая толщина решетки. Как видно из рисунка, возможно достижение дифракционной эффективности в неполяризованном свете более 50 % для толщин светочувствительных слоев БХЖ 5-50 мкм. Анализ показал, что для обеспечения высокой дифракционной эффективности для краев рабочего спектра необходимо использование слоев с толщинами 5-8 мкм.

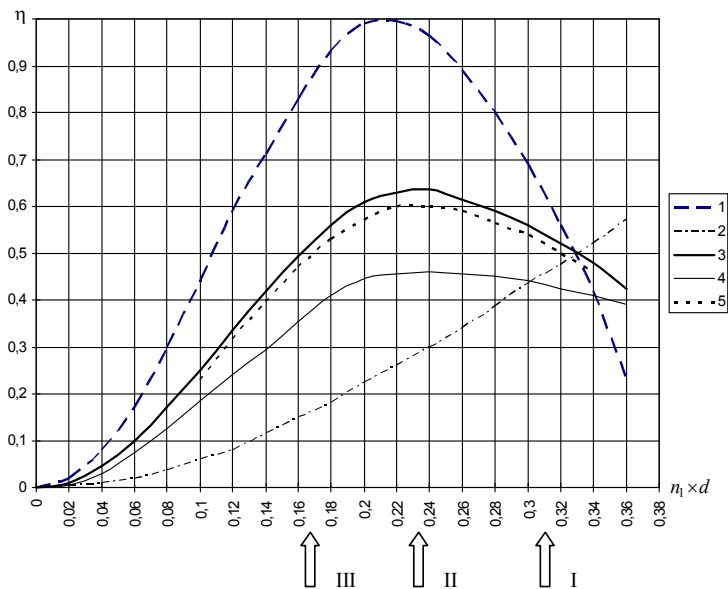


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности объемно-фазовой пропускающей дифракционной решетки с частотой 3300 мм⁻¹ от величины $(n_1 \times d)$ при $\alpha_{\text{пад}} = \alpha_{\text{дифр}} = 60^\circ$. Кривые 1, 2, 3 – ДЭ для ТЕ, ТМ поляризации и естественного света соответственно; 4 – ДЭ для естественного света с учетом френелевских отражений; 5 – ДЭ для естественного света при использовании просветляющих покрытий. Стрелками (I, II, III) указаны реально достигнутые значения величины $(n_1 \times d)$ для толщины слоев БХЖ 50, 25 и 5 мкм соответственно

Таким образом, в результате проведенной работы получены голограммные объемно-фазовые дифракционные решетки с характеристиками близкими, к оптимальным.

LARGE-SIZED HOLOGRAPHIC VOLUME PHASE GRATINGS FOR HIGH RESOLUTION SPECTRAL FACILITIES

*Lukin A.V.,¹ Belokopytov A.A.,¹ Sattarov F.A.,¹ Skochilov A.F.,¹
Tugarinov S.N.,² Shigapova N.M.¹*

*(¹ OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan;
² Private enterprise «ITER-Centre», Moscow)*

The paper contains results of investigations and optimization of plane transmission volume phase holographic gratings (VPHGs) for three-channel spectrometer ITER. The spectrometer design comprises a common collimator, VPHGs, which are compactly tandem located in spectral channels 468 ± 8 , 530 ± 8 , 656 ± 8 nm, and focusing objectives for each channel. The paper deals with the optimization of the VPHGs diffraction efficiency for nonpolarized radiation, their transmission for non-operating wavelengths, near and far contrasts of spectral images. Investigations of dichromated gelatine based light-sensitive layers have been pursued.

The obtained data are:

Clear aperture of a VPHG, mm	260×130
Grooves per mm	3700, 3300, 2650
Diffraction efficiency of a VPHG: in the centre of the operative wavelength range, not less than, %	50
Transmission at the nonoperative wavelength range, not less than, %	85
Near contrast, not more than	10^{-3}
Far contrast	10^{-4}

ЗАПИСЬ ВОГНУТЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК НЕГОМОЦЕНТРИЧЕСКИМИ ПУЧКАМИ

Белокопытов А.А.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

Применение классических вогнутых дифракционных решеток в качестве диспергирующих элементов спектральных приборов не позволяет в полной мере использовать преимущества современных многоканальных фотоприемников, так как вогнутые решетки обладают значительными aberrациями, такими как астигматизм, дефокусировка, меридиональная и сагиттальная кома. Поэтому в современных приборах все большее распространение получают вогнутые голограммные дифракционные решетки с скомпенсированными aberrациями. Запись ВГДР при помощи сферических волновых фронтов (запись точечными источниками) позволяет исправить дефокусировку, астигматизм и меридиональную кому. Однако для светосильных приборов и приборов с высокой дисперсией качество изображения входной щели при использовании записи точечными источниками оказывается недостаточным, т.к. начинает сказываться влияние сагиттальной комы. При использовании многоканальных фотоприемников серьезной проблемой может стать наличие астигматизма, значительно снижающего реальную светосилу прибора. Одним из наиболее эффективных средств повышения качества изображения, даваемого ВГДР в плоскости регистрации, является коррекция aberrаций на стадии записи дифракционной решетки за счет намеренного искажения волновых фронтов лазерных пучков. Высокую степень коррекции aberrаций обеспечивает запись ВГДР негomoцентрическими пучками, полученными, например, с помощью вогнутых зеркал (ВГДР 2-го поколения) рис. 1.

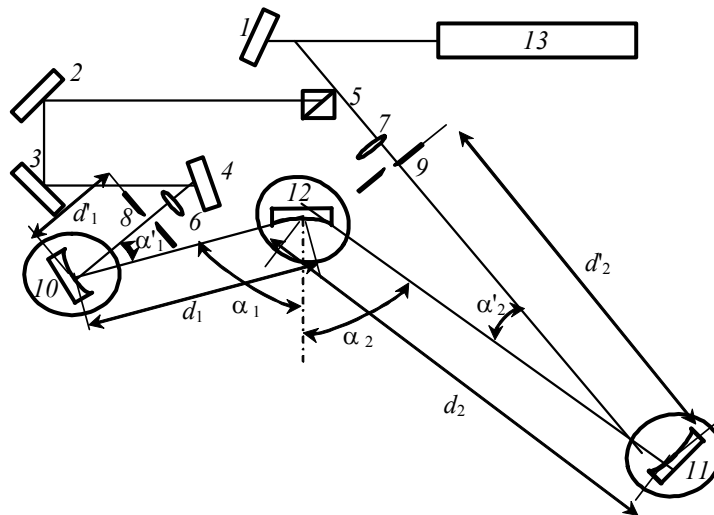


Рис. 1. Оптическая схема голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения:
1-4 – поворотные зеркала; 5 – светоделительный кубик; 6, 7 – микрообъективы; 8, 9 – точечные диафрагмы;
10, 11 – цилиндрические зеркала; 12 – подложка ВГДР

В работах [1-3] подробно изложены вопросы расчета оптических схем спектрометров с ВГДР и схем записи голограммных ВГДР 2-го поколения.

Описание голографической установки.

Для записи ВГДР 2-го поколения в ОАО «НПО ГИПО» была создана специальная голографическая установка, использующая для создания негomoцентричности пучков наклонное

падение на вогнутые цилиндрические зеркала [4]. Установка представляет собой массивную виброзащищенную плиту с размещенными на ней узлами крепления оптических элементов и юстировочными механизмами: делительным столом с установленным на нем узлом крепления подложки, поворотными зеркалами, светоделителем и двумя узлами крепления микрообъективов и точечных диафрагм. Фотография схемы регистрации представлена на рис. 2.

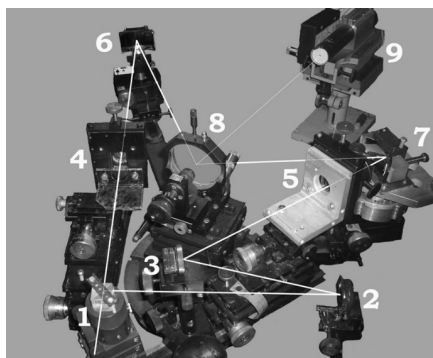


Рис. 2. Фотография голографической установки для записи голограммных дифракционных решеток 2-го поколения: 1 – светоделитель; 2, 3 – плоские зеркала линии задержки; 4, 5 – узлы крепления микрообъективов и точечных диафрагм; 6, 7 – цилиндрические зеркала; 8 – подложка; 9 – юстировочный лазер ВГДР 2-го поколения изготавливались по стандартной технологии, применяемой в ГИПО при производстве серийных ВГДР

Данная голографическая установка позволяет получать ВГДР 2-го поколения с частотой штрихов от 400 до 3600 штр/мм на заготовках диаметром до 70 мм. Достоинствами установки являются: универсальность, высокая виброустойчивость, относительная простота юстировки и эксплуатации. Применяемая методика юстировки позволяет собирать схему регистрации с погрешностью взаимного расположения оптических элементов порядка 0,1 мм. Установка может быть использована в производстве как серийных, так и уникальных ВГДР.

Схема регистрации была собрана в специализированной лаборатории, расположенной под землей на глубине 15 метров. Все узлы размещались на массивной виброзащищенной голографической плите. С целью максимальной защиты схемы от воздействия конвективных потоков воздуха, присутствующих в любом помещении, голографическая установка со всех сторон закрывалась ширмами.

В качестве источника когерентного излучения использовался одномодовый He-Cd лазер ГКЛ-50 с длиной волны излучения $\lambda = 441,6$ нм. Лазер располагался над голографической установкой так, чтобы исключить влияние конвективных потоков воздуха от нагретого активного элемента и вибраций, порождаемых охлаждающими вентиляторами. Излучение лазера направлялось в установку системой поворотных зеркал.

Конструкция установки позволяет реализовать любые методы получения негомоцентричности пучков с применением вогнутых зеркал, цилиндрических объективов и вспомогательных дифракционных решеток.

С помощью разработанной установки были получены ВГДР 2-го поколения с частотой 3600 штр/мм, диаметром рабочей поверхности 70 мм, рассчитанные на рабочий спектральный диапазон 160-360 нм. Результаты исследования оптических характеристик этих решеток приведены в работе [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2003.

2. Павлычева Н.К. Голограммные дифракционные решетки 2-го и 3-го поколений в схеме спектрографа Роуланда // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 4. С. 69-74.

3. Palmer C. Theory of second-generation holographic diffraction gratings // J. Opt. Soc. Amer. 1989. Vol. A6. № 8. P. 1175-1178.

4. Белокопытов А.А., Павлычева Н.К., Селезнев В.А. Получение голограммных дифракционных решеток в негомоцентрических пучках // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 3.

5. Белокопытов А.А., Шакиров Н.Ф. Спектрограф с голограммной дифракционной решеткой второго поколения // Оптический журнал. – Т. 77. №8. 2010. – С. 61-66.

RECORDING OF CONCAVE HOLOGRAPHIC GRATINGS BY NONHOMOCENTRIC BEAMS

Belokopytov A.A.

*(OJSC «Scientific and Production Association
«State Institute of Applied Optics», Kazan)*

The paper deals with some problems of manufacturing concave holographic gratings of the 2nd generation, in which nonhomocentricity of interfering beams is obtained with the help of cylindrical mirrors, and it specifies the advantages of these gratings over the conventional ones. The paper describes a holographic facility, developed at OJSC «NPO GIPO», designed to manufacture gratings of the 2nd generation, and it presents the results obtained during an experimental investigation of optical parameters of these gratings.

РЕШЕТКИ-ПОЛЯРИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Балоев В.А., Знаменский М.Ю., Лукашевич Я.К., Саттаров Ф.А.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики»,
г. Казань)*

Поляризаторы из линейных проводников, известные как решетки-поляризаторы, показали высокую эффективность в качестве поляризаторов и анализаторов в широком диапазоне электромагнитных волн [1]. Для ИК-области спектра было предложено изготавливать их, используя в качестве линейных структур оригинальные нарезные дифракционные решетки, выполненные непосредственно в материале подложки. Линейные проводники получали методом вакуумного нанесения на часть одной из граней штрихов металлического покрытия [2]. Дальнейшее развитие в отечественных разработках этот способ получил в работах [3, 4]. Он обладает высокой технологичностью операций, но требует длительного цикла изготовления нарезных решеток.

В настоящей работе для этих целей используются голограммные дифракционные решетки, для чего разрабатываются режимы и условия выполнения технологических операций, направленные на достижение и сохранение высокой поляризирующей способности и высокого пропускания с минимизацией модуляции их по спектру. Нами изготовлены решетки-поляризаторы на подложках из фтористого кальция, фтористого бария, селенида цинка, оптического германия. При изготовлении голограммных дифракционных решеток в качестве светочувствительного слоя использовались халькогениды, обладающие достаточно высоким пропусканием в ИК-области спектра, в основном, селенид мышьяка.

При нанесении металлического покрытия мы частично использовали способ, предложенный в работе [5]. Целью применения этого способа было увеличение высоты проводников в их поперечном сечении и, соответственно, увеличение поляризирующей способности решеток-поляризаторов. На рис. 1. проиллюстрирован этот эффект.

Неблагоприятным фактором при использовании тонкослойных покрытий для изделий, работающих на пропускание, является модуляция коэффициента пропускания по длинам волн, что вызвано различием коэффициентов преломления материалов подложки и слоя. Исходя из этого, нами подбирались толщины светочувствительных слоев. Для подложек с большим показателем преломления (германий, селенид цинка) оптимальным является селенид мышьяка с рабочей толщиной не более 0,9 мкм. Для подложек из фтористого бария и фтористого кальция – сульфид мышьяка с толщиной не более 0,4 мкм.

Все поляризаторы изготавливались на основе голограммных дифракционных решеток с частотой штрихов, равной 3600 мм^{-1} . Как правило, все образцы обладают поляризирующей способностью не менее 99% в диапазоне длин волн от 1,5 мкм до верхней границы области прозрачности материала решетки при достаточно высоком их коэффициенте пропускания.

На рис. 2 приведены графики пропускания излучения параллельного и перпендикулярного штрихам решеток-поляризаторов из селенида цинка и оптического германия стандартных размеров диаметром 25 мм.

Нами также отработан способ получения решеток-поляризаторов с просветляющим покрытием тыльной стороны подложки.

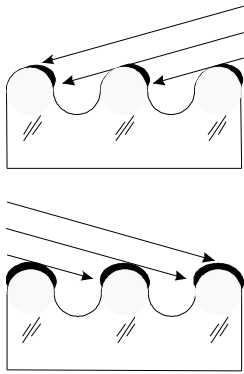


Рис. 1. Схема процесса формирования металлических проводников

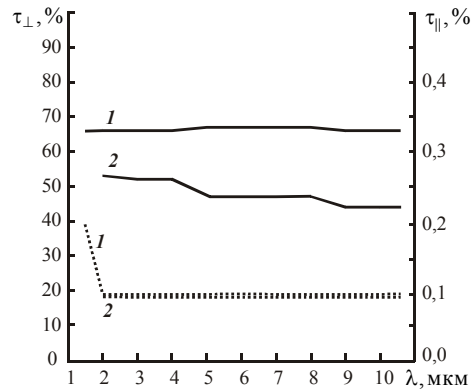


Рис. 2. Графики пропускания поляризаторов на подложках из селенида цинка (1) и оптического германия (2): τ_{\perp} – сплошная линия; τ_{\parallel} – прерывистая линия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Du Bois H., Rubens H.* On polarization of undiffracted longwaved heat rays by wire gratings – *Phil. Mag.*, 1911. V. 22. № 128. P. 322-327.
2. *Bird G.R. and Parrish.* The Wire Grid as a Near-Infrared Polarizer. – *J. Opt.Soc. Am.*, 1960. V. 50. № 9. P. 886-891.
3. *Яковлев Э.А.* Исследование поляризующих свойств дифракционных решеток. Диссертация канд. физ.-мат. наук. – Л. ГОИ, 1965. 133 с.
4. *Лукашевич Я.К.* Технология изготовления поляризаторов электромагнитного излучения из линейных проводников на основе нарезных дифракционных решеток. Диссертация канд. тех. наук. – Казань. ГИПО, 2002. 159 с.
5. Способ получения отражающего покрытия: – А.С. 909819 СССР / Я.К. Лукашевич, В.П. Герасимов. – № 2596533/18-10; Заявл. 11.07.80; Зарегистр. в Гос. реестре изобр. СССР 2.11.81 г.

POLARIZERS ON THE BASIS OF HOLOGRAMME DIFFRACTION GRATINGS

Baloev V.A., Znamensky M.Ju., Lukashevich Ja.K., Sattarov F.A.

*(OJSC «Scientific and Production Association
«State Institute of Applied Optics», Kazan)*

Effects of operations on manufacture of polarizers on the basis of the diffraction hologramme lattices are resulted. In the capacity of photosensitive layers selenide and arsenic sulphide used. For the purpose of reaching of high values of polarising ability and a gating through of polarizers the expedient of drawing of a plating on a part of basils of primes of a lattice, under a certain angle to a lattice surface, from two opposite directions is applied. For decrease of modulation of transmission coefficients values of widths of photosensitive layers for their various combinations to materials of emulsion carriers are chosen.

Samples of polarizers on fluorine calcium, fluorine barium, optical germanium, zinc selenide are gained. Profiles of transmission coefficients of polarizers on optical germanium and zinc selenide are resulted.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА НАРЕЗНОГО АНАЛОГА ВОГНУТОЙ ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ С КОРРЕКЦИЕЙ АБЕРРАЦИЙ

Гаранина Ю.В.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Вогнутая голограммная дифракционная решетка является наиболее совершенным оптическим компонентом, используемым в оптических схемах современных спектральных приборов. Она обладает одновременно фокусирующими и диспергирующими свойствами и, следовательно, может являться единственным оптическим элементом в схеме спектрометра. Кроме того, путем изменения шага и кривизны штрихов, определяемых параметрами схемы записи решетки, можно реализовать коррекцию ее aberrаций в конкретной схеме работы и обеспечить высокое качество изображения [1]. Однако в некоторых случаях параметры схемы записи могут оказаться нетехнологичными либо невыполнимыми. В этом случае решетку изготавливают путем механической нарезки на специальной делительной машине, выдерживая расчетные значения шага и кривизны штриха (решетки с криволинейными штрихами и неравномерным шагом штрихов относят к неклассическим). Дополнительными преимуществами использования такого нарезного аналога голограммной дифракционной решетки являются большее число свободных коррекционных параметров, а также возможность получить треугольный профиль штриха и максимизировать дифракционную эффективность решетки в рабочем спектральном диапазоне.

При расчете параметров неклассических нарезных решеток по аналитическим методикам, а также при их изготовлении, пользуются следующим полиномиальным представлением формы штриха. Шаг штриха e зависит от меридиональной координаты точки на поверхности решетки y :

$$e = e_0 (\mu y + \nu y^2 + \xi y^3). \quad (1)$$

Аналогичным образом определяется зависимость радиуса кривизны штриха от координаты:

$$\rho = \rho_0 + p y. \quad (2)$$

С другой стороны, при моделировании и оптимизации схем с неклассическими дифракционными решетками в различных программных средах, например Zemax, используется уравнение, описывающее изменение фазы волнового фронта, вносимое решеткой:

$$f = \sum_{i=1}^n C_i E_i(x, y), \quad (3)$$

В случае если известны параметры исходной голограммной решетки, в частности, коэффициенты голографирования H_{ijk} , для перехода к фазовым коэффициентам можно использовать уравнения связи, приведенные в [2]. Другой подход подразумевает аналитический расчет параметров нарезки, входящих в (1)-(2) и дальнейший переход к фазовым коэффициентам. Отметим, что в [2] также показана возможность такого перехода, однако рассмотрен случай вогнутой неклассической нарезной решетки только с тремя свободными параметрами нарезки. Комбинируя уравнения связи между коэффициентами голографирования, параметрами

нарезки и фазовыми коэффициентами, приведенные в [1] и [2], находим уравнения связи для общего случая:

$$\begin{aligned}
 C_2 &= \sin i_1 - \sin i_2; \\
 C_3 &= \frac{-(\sin i_1 - \sin i_2)}{2\rho_0}; \\
 C_5 &= \frac{-\mu(\sin i_1 - \sin i_2)}{2}; \\
 C_7 &= \left(p - \frac{\mu(\sin i_1 - \sin i_2)^2}{4\rho_0} \right) \frac{\sin i_1 - \sin i_2}{2\rho_0^2}; \\
 C_9 &= \frac{1}{3} \left(v - \frac{\mu^2}{2} \right) (\sin i_1 - \sin i_2) R.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где R – радиус поверхности решетки, i_1 и i_2 – угловые координаты источников записи исходной голограммной решетки.

Данные уравнения могут быть использованы при задании вогнутой неклассической нарезной решетки в среде Zemax. Удобно реализовать функцию расчета фазовых коэффициентов в виде отдельной подпрограммы-макроса.

В качестве примера моделирования неклассической нарезной решетки рассмотрим схему спектрографа с плоским полем со следующими параметрами: рабочий спектральный диапазон 730-370 нм; эквивалентное относительное отверстие 1:4,5; длина изображения спектра 25 мм; радиус поверхности решетки 150 мм. Первоначально по методике, описанной в [1] рассчитываем параметры схемы спектрографа с плоским полем и параметры исходной голограммной решетки. Определяем значения параметров нарезки μ , ν , ρ_0 . В результате получаем координаты центра входной щели ($2,292^\circ, 152$ мм) и центра спектра ($12,032^\circ, 151,87$ мм), а также частоту штрихов решетки в вершине 451,2 штр/мм и параметры нарезки $\mu = -1,26 \cdot 10^{-3}$, $\nu = -2,78 \cdot 10^{-7}$, $\rho = 13629$.

Дополнительно из условий коррекции сагиттальной комы и сферической aberrации [1] определяем: $p = 66,88$, $\mu = 3 \cdot 10^{-9}$.

Оптическая схема спектрографа приведена на рис. 1. На схеме обозначены: 1 – входная щель; 2 – дифракционная решетка; 3 – плоскость регистрации спектра.

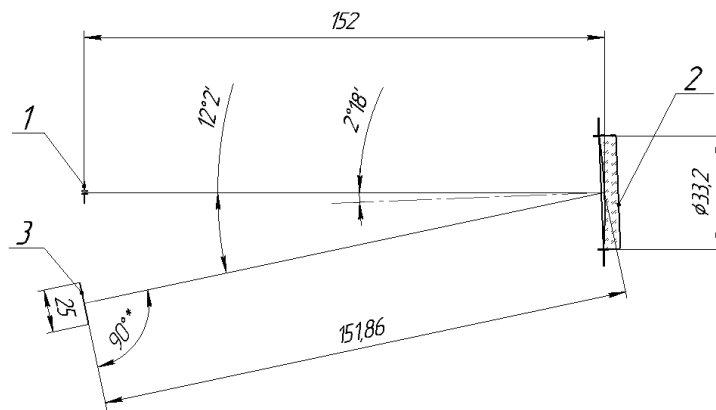


Рис. 1. Схема спектрографа

Моделирование рассчитанной схемы проводилось двумя способами: средствами программы Zemax, использующей фазовые коэффициенты для описания решетки, и средствами программы KvantSP, использующей непосредственно параметры нарезки. Аберрации спектрографа в микрометрах приведены в табл. 1 (абerrации согласно расчету в Zemax даны курсивом).

Таблица 1

<i>m</i>	<i>M</i>	$\lambda_1 = 550 \text{ нм}$ $y' = 0 \text{ мм}$		$\lambda_2 = 370 \text{ нм}$ $y' = 12,54 \text{ мм}$		$\lambda_3 = 730 \text{ нм}$ $y' = -12,77 \text{ мм}$	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
15,0	0	-0,8	0	-92,8	0	-96,1	0
		-0,4	0	-92,1	0	-86,3	0
10,6	0	-0,3	0	-64,3	0	-70,5	0
		-0,2	0	-64,5	0	-64,1	0
-10,6	0	0,3	0	60,4	0	82,2	0
		0,2	0	60,5	0	75,6	0
-15,0	0	0,8	0	84,9	0	119,2	0
		0,4	0	84,1	0	108,8	0
0	10,6	-0,5	-58,6	-0,8	-234,5	1,1	119,4
		-0,3	-2,5	-0,8	-198,6	2,1	196,0
0	15,0	-0,9	-82,8	-1,6	-331,5	2,1	168,9
		-0,5	-4,0	-1,5	-278,1	4,1	274,3

На рис. 2 приведены аппаратные функции (АФ) спектрографа для ширины щели 100 мкм. Ширина АФ на половине высоты составляет 100-137 мкм. С учетом обратной линейной дисперсии, равной 13,2 нм/мм, соответствующее спектральное разрешение составит 1,3-1,8 нм.

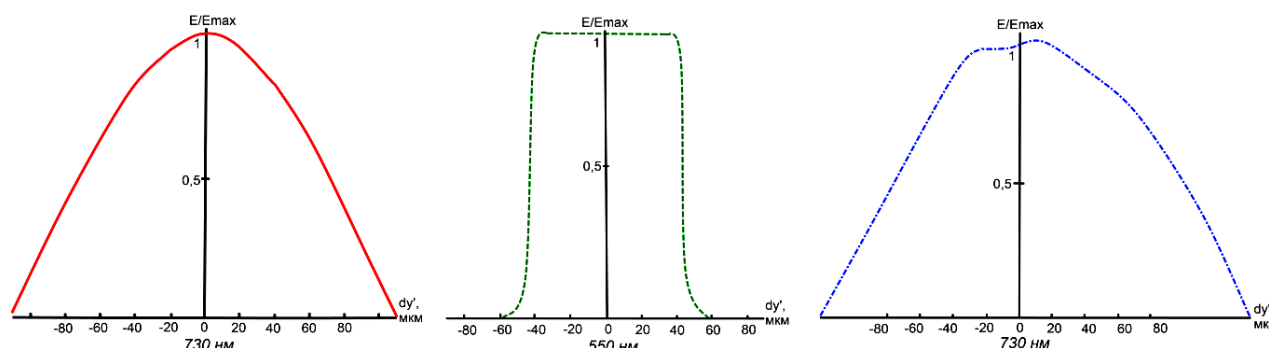


Рис. 2. Аппаратные функции спектрографа

Таким образом, в рамках данной работы исследованы возможности моделирования нарезного аналога вогнутой голограммной дифракционной решетки средствами Zemax. Выведены зависимости фазовых коэффициентов от параметров нарезки. На примере схемы спектрографа с плоским полем для видимого диапазона продемонстрировано хорошее согласование результатов, полученных с помощью различных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлычева, Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками – Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2003. – 198 с.
2. Sokolova E.A. Simulation of Mechanically Ruled Concave Diffraction Gratings by Use of an Original Geometric Theory / Appl. Opt. 43, 20-28. 2004.

AUTOMATIZATION OF DESIGN OF A RULED ANALOGUE OF ABERRATION-CORRECTED CONCAVE HOLOGRAPHIC GRATING

Garanina Yu.V.

(Kazan National research Technical University named after A.N Tupolev - KAI)

A concave holographic grating is one of advanced optical components used in spectral instruments optical schemes. It has both of focusing and dispersing properties and in addition can introduce aberration correction in a certain working scheme [1]. However, in some cases the grating recording parameters can be impracticable. Then the grating can be produced by mechanical ruling with maintenance of the required grooves spacing and curvature. Such a ruled analogue is notable for additional correction parameters and possibility to introduce blaze in the working spectral range.

In design and manufacturing of a ruled grating it's adopted to use polynomial expressions for the grooves spacing and curvature. Meanwhile in optimization and modeling software like Zemax phase equations are used to describe such grating. The problem of conversion between these equations was already considered for 3 ruling parameters in [2]. Combining equations from [1] and [2] we derived formulas connecting 5 ruling parameters and phase coefficients.

For demonstration of non-classical ruled grating modeling in Zemax, we designed a flat-field spectrograph scheme for the region between 370 and 630 nm. It's F/# equal to 4,5, spectrum length is 25 mm, grating radius as well as the scheme length is 150 mm. Modeling results shown that the scheme provides spectral resolution equal to 1,3 - 1,8 nm. Besides, the results obtained with Zemax, which uses phase coefficients, and KvantSP, which uses ruling parameters directly, are in a good agreement.

REFERENCES

1. *Pavlycheva N.K.* Spectral instruments with non-classical diffraction gratings – Kazan: KSTU, 2003. – 198 p.
2. *Sokolova E.A.* Simulation of Mechanically Ruled Concave Diffraction Gratings by Use of an Original Geometric Theory/ Appl. Opt. 43, 20-28, 2004.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ

Ахметшина И.И., Бикбаев М.Ш.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Синтезированные голограммные оптические элементы (СГОЭ) используются в качестве фокусирующих, корректирующих и эталонных элементов при решении задач коррекции аберраций оптических систем, контроля формы сложных асферических поверхностей, построения компактных оптических систем в фотолитографии и телекоммуникациях. СГОЭ отличаются способностью формировать произвольный волновой фронт (ВФ), высокой точностью восстановления заданного волнового фронта, технологичностью и компактностью. При этом наибольший практический интерес представляют осевые синтезированные голограммы. Они получили наибольшее распространение, поскольку большинство преобразуемых ими волновых фронтов и работающих с ними оптических систем обладают свойством осевой симметрии. Методы расчета и изготовления таких голограмм сравнительно просты и хорошо отработаны [1, 2].

Однако в цепочке расчета и технологической подготовки изготовления СГОЭ, используемой отечественными производителями, существуют информационные разрывы. Их возникновение связано, в частности, с отсутствием согласования способов описания параметров СГОЭ, форматов представления данных и программных средств, используемых при расчете параметров СГОЭ и при формировании управляющей программы для технологического оборудования. В результате время на расчет и подготовку производства возрастает, возникает риск снижения точности изготовления, появляются ограничения на параметры схемы работы СГОЭ, геометрию его профиля и др.

В частности, возможность расчета осевых синтезированных голограмм предусмотрена в большинстве программ проектирования оптических систем (Zemax, Code V, OSLO). Для описания голограммы при расчете используется так называемая бинарная поверхность, описываемая уравнением разности фаз:

$$f = k \sum_{j=1}^n A_j \rho^{2j}, \quad (1)$$

Здесь k – порядок дифракции; ρ – нормированная радиальная координата точки на поверхности СГОЭ; A_j – фазовый коэффициент.

Такое представление удобно при расчете и оптимизации оптической системы, однако не может быть использовано при технологической подготовке производства. Для оценки технологичности рассчитанной конфигурации СГОЭ следует использовать зависимость частоты ее штрихов от радиальной координаты, а для формирования управляющей программы для делительной машины необходимо определить координаты точек подъема и опускания резца при нарезке каждого штриха голограммы. Кроме того, для достижения высокой дифракционной эффективности СГОЭ следует выполнять его профиль ступенчатым, а при моделировании стандартными средствами доступен только бинарный профиль.

Для согласования различных этапов разработки СГОЭ алгоритм преобразований его параметров были реализованы в виде специализированной программы. Программа написана на языке ZPL и работает непосредственно в среде Zemax. Такой подход позволяет осуществлять расчет, оптимизацию и первичную технологическую подготовку производства оптических систем со СГОЭ в единой программной среде.

Для расчета закона изменения частоты штрихов используется соотношение:

$$N = 1/2\pi \sum_{j=1}^n (2^j A_j) / \rho_{\text{ном}}(\rho)^{2j-1}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ном}}$ – радиус нормировки, соответствующий световому радиусу СГОЭ.

Картина штрихов СГОЭ соответствует результату интерференции объектного и опорного ВФ. Первый соответствует требуемой форме ВФ, второй – исходной (обычно плоской или сферической). Тогда функция пропускания (отражения СГОЭ) может быть записана в виде [2]

$$J(\rho) = 2[1 + \cos(f(\rho))]. \quad (3)$$

Координаты краев штриха для каждого уровня квантования ступенчатого профиля рассчитываются путем определения точек пересечения кривой (3) с некоторым постоянным уровнем J_0 . Для задания данного уровня на практике принято использовать параметр скважности [2]

$$Q = \frac{\lambda}{2\Delta l_0}, \quad (4)$$

где Δl_0 – разность хода, соответствующая условию $J = J_0$, λ – длина волны.

Таким образом, учитывая ширину резца можно получить координаты точек его подъема и опускания для каждого уровня. Далее результирующий ступенчатый профиль получают путем наложения результатов, полученных для каждого значения скважности.

Для иллюстрации работы программы рассмотрим СГОЭ, используемую для контроля формы главного зеркала телескопа Ричи-Кретьена (рис. 1, а) с фокусным расстоянием 1000 мм и относительным отверстием 1:11,7.

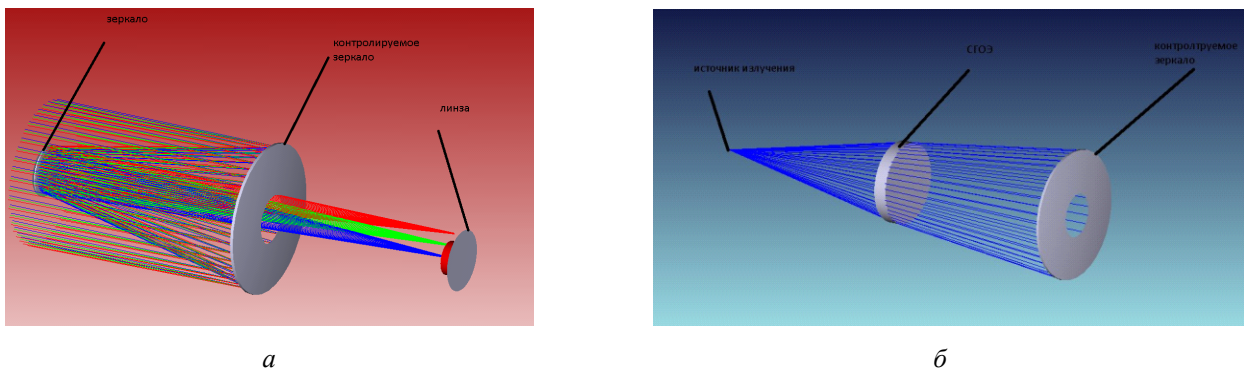


Рис. 1. Оптические схемы: а – схема телескопа Ричи-Кретьена; б – схема контроля главного зеркала

Главное зеркало имеет форму гиперболоида вращения (вершинный радиус 339,35 мм, коническая постоянная $-1,046$, световой диаметр 100,1 мм, диаметр центрального отверстия 34 мм). Для определения отклонений его формы используется автоколлимационная схема, в которой СГОЭ преобразует сферический ВФ от точечного источника в ВФ, соответствующий расчетной форме зеркала. Длина волны контроля равна 633 нм, расстояния от источника до СГОЭ и от СГОЭ до зеркала – 150 мм (рис. 1, б). СГОЭ нанесен на плоскопараллельную пластинку из стекла К8 толщиной 10мм.

Параметры СГОЭ были определены с помощью разработанной специализированной подпрограммы. Цикл расчета включал автоматическую оптимизацию схемы с целью определения значений фазовых коэффициентов СГОЭ, расчет закон изменения частоты штрихов голограммы по описанному выше соотношению (рис. 2, а), расчет координат краев отдельных

штрихов СГОЭ при трех уровнях квантования ступенчатого профиля со значениями свкажности $Q = 2, 3$ и 5 (рис. 2, б). Далее в автоматическом режиме формировалась демонстрационная управляющая программа нарезки СГОЭ на стандартном G-коде.

Отметим, что диаметр голограммы равен $62,5$ мм, а частота штрихов на краю составляет $103,6$ штр/мм и ее зависимость от радиальной координаты близка к линейной, следовательно рассчитанные параметры СГОЭ не нарушают существующих технологических ограничений.

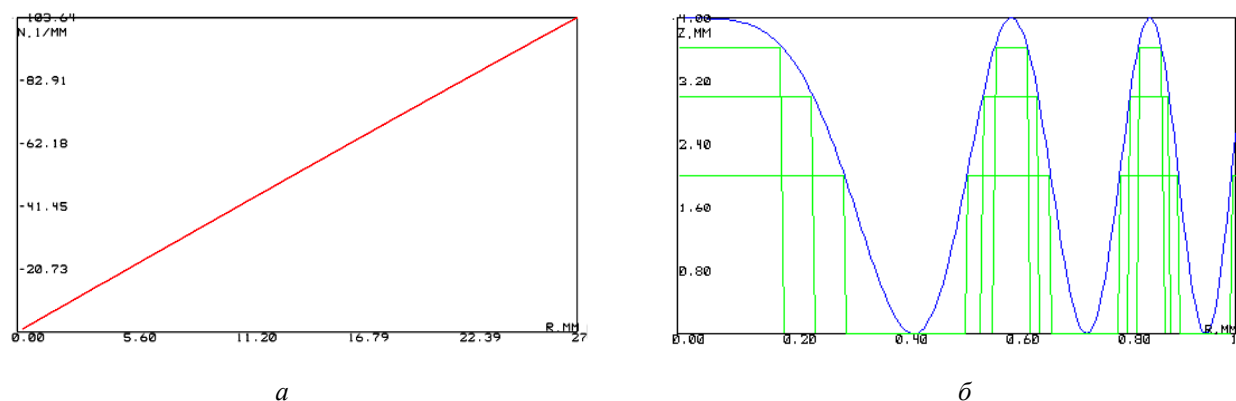


Рис. 2. Результаты расчета СГОЭ:

а – закон изменения частоты штрихов; б – координаты отдельных штрихов при трех уровнях квантования

Таким образом, в ходе работы удалось в значительной мере автоматизировать расчет СГОЭ и подготовку данных для их изготовления. Удалось реализовать автоматический расчет частоты СГОЭ со ступенчатым профилем штриха, координат его штрихов, а также формирование управляющей программы для технологического оборудования, значительно сократив время и трудоемкость этапа расчета СГОЭ.

В перспективе полученные результаты могут позволить автоматизировать расчет и подготовку производства СГОЭ с произвольной картиной штрихов без осевой симметрии, а также реализовать изготовление СГОЭ на неспециализированных станках ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корешев С.Н. Голограммные оптические элементы и устройства [Текст]/ С.Н. Корешев – СПб: НИУИТМО, 2013. – 143 с.
2. Агачев А.Р. Голограммные оптические элементы [Текст]/А.Р. Агачев, В.П. Ларионов, А.В. Лукин и др.//Оптический журнал. – 2002 – Т. 69. № 12. – С. 23-31.

AUTOMATIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS COMPUTATION FOR A COMPUTER GENERATED HOLOGRAMS

Akhmetshina I.I., Bikbaev M.Sh.

(Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan)

Computer generated holograms (CGH) are used as focusing, correction or reference elements in such tasks as aberration correction, aspherics testing, building of compact optical systems for photolithography and telecommunications. CGHs are notable for possibility to form an arbitrary wavefront with a high accuracy, manufacturability and compactness. Axial (circular) ones are the most common type of the CGHs. There is a number of simple methods for their design and fabrication [1, 2].

However, there are gaps in the transfer of data in the CGH production process. In optical design software like Code V or Zemax phase delay equation is used to describe a CGH, while in theoretical calculations it's represented by dependence of the grooves frequency on coordinate and in manufacturing CGH is given by coordinates of the grooves edges.

We developed a macro for Zemax, which allows to calculate phase equation of a CGH in an aspherical surface testing scheme automatically. Then it calculates the grooves frequency and coordinates of the grooves for the given filling factor and number of layers. Finally it allows to create a control program (in G-code) for the CGH manufacturing.

We illustrate work of our program on example of CGH for testing of primary mirror for Ritchie-Cretien telescope. The telescope has focal length of 1000 mm and F/# equal to 11,7. The primary mirror is hyperboloid with the vertex radius of 339,35 mm, conical constant of $-1,046$ and clear aperture of 100 mm. In the testing scheme the CGH is made on the second surface of 10-mm-thick plate made of BK7 (K8) and located 150 mm away from the mirror surface. We calculated parameters of CGH with 3 levels for this scheme. Its' maximum frequency was found to be $103,6 \text{ mm}^{-1}$.

Thus, in the present work we automated calculation of a CGH parameters and preparation for its' manufacturing. Automated design of a multi-level CGH, the grooves coordinates as well as generation of control program are available in our Zemax macro.

REFERENCES

1. *Koreshev S.N.* Holographic optical elements and devices [Text]/ S.N. Koreshev – St-Petersburg: ITMO Univ., 2013. – 143 p.
2. *Agachev A.R.* Holographic optical elements [Text]/A.R. Agachev, V.P. Larionov, A.V. Lukin et al. // J. of Optical Tech. – 2002. – V. 69. № 12. – P. 23-31.

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ УВИ-ДИАПАЗОНА

Муслимов Э.Р., Ахметов М.М., Лукин А.В., Мельников А.Н.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

В настоящее время универсальные малогабаритные спектральные приборы получили весьма широкое распространение для решения аналитических задач в ведущих отраслях науки, технологии и медицины; сформировался отдельный сегмент рынка. Как правило, такие приборы работают в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном (УВИ) диапазонах и обладают ограниченным спектральным разрешением. В большинстве случаев подобные приборы строятся по схеме спектрографа с вогнутой неклассической дифракционной решеткой (ДР) и используют ПЗС-линейку для регистрации спектра. Разработка новых приборов данного класса, повышение их функциональных характеристик и обеспечение их конкурентоспособности требуют применения новых схемных решений, а также следует максимально использовать имеющуюся технологическую базу.

Выполнить перечисленные требования возможно, в частности, при использовании оптической схемы с двумя сопряженными каналами регистрации, подобной продемонстрированной в [1]. В такой оптической схеме рабочий спектральный диапазон делится на два поддиапазона, первый из которых регистрируется спектрографом с плоским полем на базе вогнутой отражательной голограммной дифракционной решетки (ВОГДР). В нулевом порядке дифракции ВОГДР устанавливается пропускающая вогнутая голограммная решетка (ПВГДР), формирующая спектр во втором поддиапазоне. Такая оптическая схема отличается высоким спектральным разрешением в расширенном диапазоне длин волн, а также простотой и компактностью. Использование двух сопряженных спектрографов без сменных и подвижных элементов и с регистрацией всего спектра за один кадр с помощью многоканального фотоэлектрического приемника позволяет значительно ускорить процесс измерений. Последнее обстоятельство позволяет отнести разрабатываемый прибор к категории спектроанализаторов [2].

На базе описанного подхода разработана оптическая схема компактного двухканального спектрометра для УВИ-диапазона. На основе анализа характеристик существующих приборов рассматриваемого класса [3–5] выбран рабочий спектральный диапазон 390 – 800 нм как наиболее информативный. Установлено, что значение спектрального разрешения для большинства потенциальных приложений не должно превосходить 0,3 нм. Расстояние от входной щели до ВОГДР первого канала принято равным 155 мм. Значения частоты штрихов ДР выбраны в соответствии с указанными ограничениями, а также с учетом длин чувствительных площадок серийных фотоприемников [6, 7]. При близких технических характеристиках приемников выбор делался в пользу более доступного варианта [7], и окончательная конфигурация оптической схемы согласовывалась с его параметрами. Числовая апертура прибора ограничена значением 0,05. Рабочий диапазон разделен на два одновременно регистрируемых поддиапазона: диапазон 556 – 800 нм регистрируется первым каналом на основе ВОГДР, а диапазон 390 – 560 нм – вторым каналом с ПВГДР. После определения исходных данных проведен расчет параметров каждого из каналов по методике, описанной в [1].

Первый канал строится на базе отражательной ДР с частотой штрихов 670 мм^{-1} , нанесенной на вогнутой отражательной поверхности радиусом 149,97 мм. Угол падения излучения на ДР равен 9° . Обратная линейная дисперсия первого канала равна 8,8 нм/мм, длина спектра на приемнике – 27,8 мм. Для коррекции остаточной дефокусировки на краях спектра вблизи плоскости регистрации установлена цилиндрическая корректирующая линза. Второй канал прибора строится на основе ПВГДР с частотой штрихов 700 мм^{-1} , нанесенной на второй поверхности ахроматического мениска. ДР установлена в нормальном падении. Обратная линейная дис-

персия составляет 13,5 нм/мм, длина спектра на приемнике – 11,9 мм. Рассчитанная оптическая схема спектрометра представлена на рис. 1.

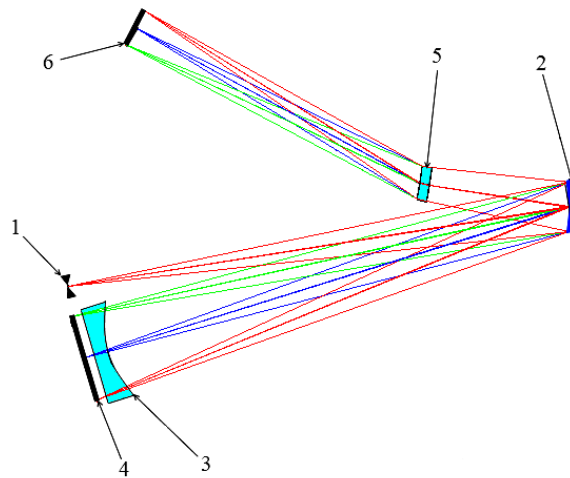


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра:

1 – входная щель; 2 – ВОГДР первого канала; 3 – корректирующая цилиндрическая линза; 4 – фотоприемник первого канала; 5 – ПВГДР второго канала; 6 – фотоприемник второго канала

Проведено компьютерное моделирование разработанной оптической схемы прибора. Для демонстрации достигаемого в схеме качества изображения приведем полученные графики аппаратных функций для ширины входной щели 15 мкм (рис. 2). Спектральное разрешение в первом канале для средней и крайних длин волн составляет соответственно 0,22; 0,23 и 0,24 нм; соответствующие значения для второго канала – 0,29; 0,20 и 0,20 нм, что достаточно высоко для приборов данного класса.

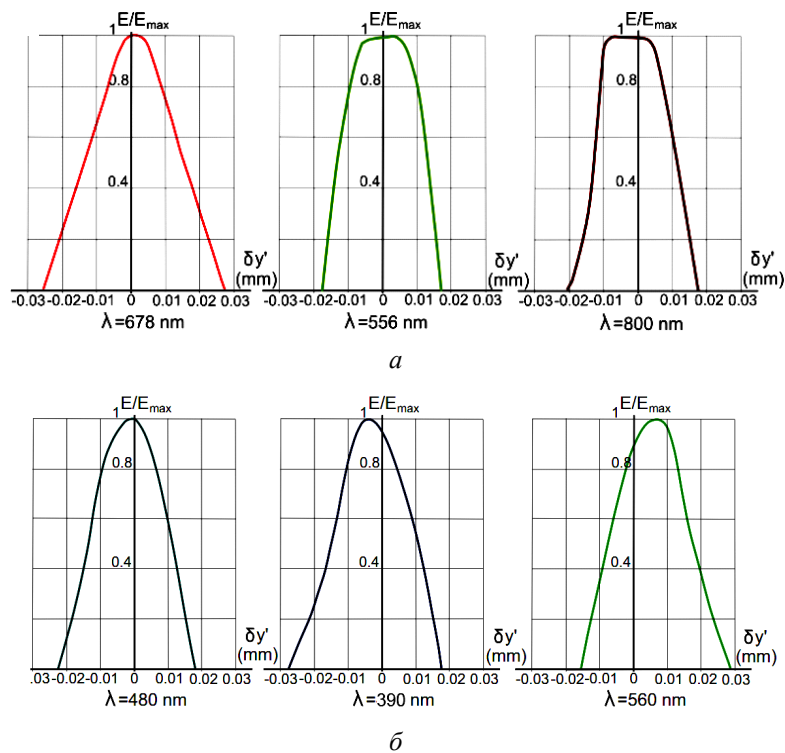


Рис. 2. Аппаратные функции спектрометра: а – для длинноволнового канала (556 – 800 нм); б – для коротковолнового канала (390 – 560 нм)

В ОАО «НПО ГИПО» разработана конструкция опытного образца спектрометра, реализующего рассчитанную схему. Обе голограммные ДР для опытного образца выполнены рельефно-фазовыми и успешно аттестованы. ВОГДР первого канала записана на слоях халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) – AsSe и покрыта отражающим слоем алюминия. ПВГДР второго канала записана на слое фоторезиста-аналога СК-17.

Проведена серия пробных измерений с использованием разработанного и изготовленного оптического блока спектрометра. В докладе для иллюстрации полученных результатов приведен эмиссионный спектр, измеренный в видимом диапазоне. Экспериментально измеренные значения спектрального разрешения совпадают с результатами компьютерного моделирования с точностью 8–17 %. При этом экспериментальные значения обратной линейной дисперсии совпадают с расчетными. Профиль зарегистрированных линий практически симметричен, а потери света, вызванные астигматическим удлинением изображения щели, не оказывают существенного влияния на процесс измерений.

Таким образом, результаты измерений подтверждают основные функциональные характеристики разработанной оптической схемы и демонстрируют ее основные преимущества. По своим основным оптическим характеристикам разработанный прибор не уступает имеющимся аналогам, либо превосходит их. При этом он отличается максимальной компактностью, отсутствием сменных элементов и подвижных частей. С технологической точки зрения преимущества разработанного спектрометра – использование серийных оптических компонентов и сравнительно невысокие требования к точности изготовления компонентов и сборки оптической схемы. Указанные преимущества обеспечат конкурентоспособность разработанного прибора на рынке и его востребованность в химической и пищевой промышленности, медицине, экологическом контроле, научных исследованиях и других областях.

Дальнейший ход работ по созданию современного универсального спектрометра предполагает разработку и изготовление специализированного электронного блока регистрации и обработки спектров. Режимы функционирования спектрометра – автономное и совместно с персональным компьютером. Создание блока регистрации потребует проведения дополнительных исследований, разработку (или адаптацию) методик измерений, включая их программную реализацию, получение эталонных спектров и формирование на их основе справочных баз данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlycheva N.K., Muslimov E.R. Compact dual-band spectrograph // *Advanced Optical Technology*. 2012. Vol. 1. № 6. Pp. 455–461.
2. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 198 с.
3. VS140 Low Cost Linear Array Spectrometers [Electronic resource] / HORIBA Jobin Yvon. – Electronic data. – [Longjumeau Cedex, France] cop. 2014. – Mode of Access: <http://www.horiba.com/ru/scientific/products/vacuum-uv-spectroscopy>, free. – Title of screen. – Lang. eng. – (Usage date: 6.09.2014).
4. SPECTRO SENSOR OSS-0081 [Electronic resource]/ Shimadzu Corp. – Electronic data. – [Kyoto, Japan] cop. 2014. – Mode of Access: <http://www.shimadzu.com/products/opt/ssu>, free. – Title of screen. – Lang. eng. – (Usage date: 6.09.2014).
5. Compact CCD spectrometer [Electronic resource]/ Thorlabs Inc. – Electronic data. – [Newton, NJ, USA] cop. 2014. – Mode of Access: <http://www.thorlabs.de/>, free. – Title of screen. – Lang. eng. – (Usage date: 6.09.2014).
6. CCD image sensors for scientific measurements [Electronic resource]/ Hamamatsu Photonics K.K. – Electronic data. – [Hamamatsu, Japan] cop. 2014. – Mode of Access: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product>, free. – Title of screen. – Lang. eng. – (Usage date: 6.09.2014).

7. CCD Linear Image Sensors [Electronic resource]/ Toshiba America Electronic Components, Inc. – Electronic data. – [Irvine, CA, USA] cop. 2014. – Mode of Access: <http://www.toshiba.com/taec/Catalog>, free. – Title of screen. – Lang. eng. – (Usage date: 6.09.2014).

TWO-CHANNEL SPECTROMETER FOR THE ULTRAVIOLET, VISIBLE AND INFRARED RANGES

Muslimov E.R., Akhmetov M.M., Lukin A.V., Melnikov A.N.

*(OJSC «Scientific and Production Association
«State Institute of Applied Optics», Kazan)*

The paper deals with an optical layout of a compact multi-purpose spectrometer for a spectral range of 390 – 800 nm. The layout comprises two conjugate channels of registration and it provides for a spectral resolution of up to 0,2 nm. The range of 556 – 800 nm is registered by the first channel by using a concave reflection holographic diffraction grating, and the range of 390 – 560 nm is registered by the second channel with a transmission concave holographic diffraction grating. A prototype spectrometer, in which this layout was implemented, was developed, manufactured and tested. It describes instrument functions of two channels of the spectrometer. For the purpose of illustration of the obtained results, the paper gives an emission spectrum, measured in the visible range. The paper presents the measurement data of its spectral resolution. The experimentally measured values of spectral resolution agree with the computer simulation results within 8–17 %. In this case the experimentally measured values of the reverse linear dispersion coincide with the calculated ones. The profiles of the registered lines are virtually symmetrical, and the light losses, caused by an astigmatic elongation of a slit image, do not influence substantially on the measurement process. It presents requirements to the special-purpose electronic unit (being under development) for spectra registration and processing.

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЖАТОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В КОМПРЕССОРЕ НА ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Любимов А.И.,¹ Романов В.В.²

¹ ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань;

² ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров)

Все современные мощные лазерные установки создаются и работают по принципу СРА (Chirped Pulse Amplification) [1]. В многоканальных петаваттных лазерных установках, предназначенных для диагностики быстропротекающих процессов в плотной горячей плазме [2-3], необходимо обеспечить на выходе компрессора требуемые временные и энергетические характеристики сжатого лазерного импульса.

Параметры компрессора, главным образом, влияют на временные и фазовые характеристики сжатого импульса, а параметры дифракционных решеток – на пространственные, спектральные и энергетические, при этом многие из них также связаны между собой.

В докладе рассмотрено влияние технологических параметров дифракционных решеток: спектрального распределения дифракционной эффективности (ДЭ) и равномерности распределения ДЭ по поверхности решетки на энергетические характеристики сжатого импульса.

В ряде работ проводились расчеты ДЭ решеток различной конструкции: с отражающим верхним слоем металла, металл–диэлектрические, диэлектрические отражательные [4–6].

В работе [5] показано, что для диапазона $\delta\lambda = 1,035 - 1,075$ мкм наиболее оптимальными с точки зрения лучевой прочности и спектрального распределения ДЭ в –1 порядке являются отражательные дифракционные решетки с многослойным диэлектрическим зеркалом и формой профиля штриха, близкой к прямоугольной.

Обычно, при расчетах ДЭ решеток, используемых в компрессорах, полагается, что обе входящие в блок решетки с многослойным диэлектрическим зеркалом идентичны, и оптимизация характеристик проводится для одной из решеток. Однако, на наш взгляд, представляет интерес случай отличающихся по характеристикам входящих в блок компрессора решеток, что позволяет использовать в процессе оптимизации дополнительные параметры. Для оптимизации выбирались следующие параметры, объединенные в массив исходных данных $(h_1, h_2, h_{H1}, h_{L1}, h_{H2}, h_{L2}, Q_1, Q_2, \nu, \theta, \lambda_0)$, где h_i – высота штриха решетки; h_{Hi} и h_{Li} – толщины интерференционных слоев с высоким и низким показателями преломления, Q_i коэффициент заполнения, соответственно; индекс $i = 1, 2$ относится к первой и второй решетке; ν – частота штрихов решеток; θ – угол падения на первую решетку. Использовались следующие максимальные (0,180; 0,180; 0,305; 0,113; 0,305; 0,113; 0,5; 0,5; 1,8; 78°, 1,06) и минимальные (0,100; 0,100; 0,30; 0,113; 0,305; 0,113; 0,3; 0,3; 1,7; 65°; 1,045) параметры, значения высоты штриха, длины волны и толщин многослойного покрытия приведены в мкм, частоты штрихов мкм⁻¹.

Выбор максимальных и минимальных значений проводился на основе предварительных расчетов, оценок и локальной оптимизации ДЭ по небольшому числу параметров одной решетки.

Для оптимизации дифракционной эффективности в –1 порядке дифракции (DE_i) нами использовалась оценочная функция [7]:

$$AF = \left[\frac{1}{N} \sum_{\lambda_n} [\rho - DE_1 \cdot DE_2(\lambda_n)]^2 \right]^{1/2},$$

где λ_v – длина волны в диапазоне $\delta\lambda = 1,045 - 1,075$ мкм, N – число точек на диапазон длин волн, ρ – максимальный коэффициент отражения после прохождения импульсом двух решеток, который задавался в диапазоне: $0,8 - 1$.

На рис. 1, а. приведено спектральное распределение ДЭ₋₁, входящих в блок решеток с одинаковой частотой штрихов $1,75 \text{ мм}^{-1}$.

На рис. 1, б. представлен результат оптимизации блока, состоящего из двух диэлектрических решеток, выполненных на подложках из кварца (SiO_2), состоящих из многослойного зеркала (19 четвертьволновых слоев HfO_2 и SiO_2), промежуточного слоя кварца, верхнего слоя двуокиси гафния, имеющего гофрированную границу с воздухом прямоугольного профиля.

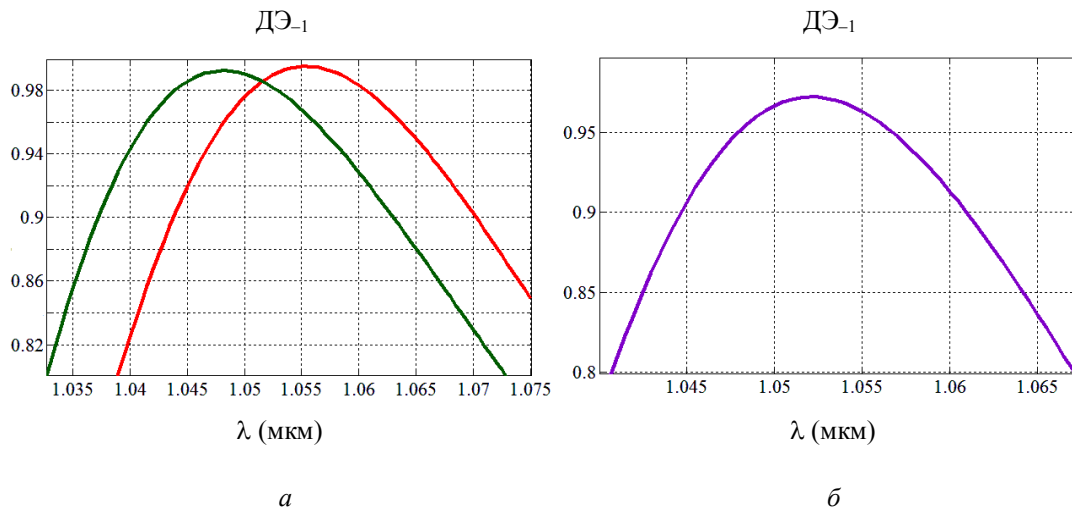


Рис. 1

В таблице приведены оптимальные параметры решеток, входящих в блок.

h_1	h_2	$h_{H1,2}$	$h_{L1,2}$	Q_1	Q_2	ν	θ	λ_0
0,167	0,172	0,113	0,305	0,35	0,5	1,75	77°	1,053

По уровню 0,85 блок из двух дифракционных решеток обеспечивает спектральную ширину $\delta\lambda \sim 27 \text{ нм}$ при центральной длине волны $\lambda_0 = 1,053 \text{ нм}$, а общее пропускание при двух проходах равно 0,72, при этом снижаются требования к идентичности решеток.

Неравномерность распределения ДЭ по поверхности решетки может привести как к искажению формы сжатого импульса, так и некоторому улучшению энергетических характеристик импульса.

При дифракции chirпированного импульса на первой решетке дифрагированные спектральные компоненты на второй решетке будут расположены на разных участках поверхности. Поэтому, задавая неравномерность распределения ДЭ второй дифракционной решетки таким образом, чтобы для каждой спектральной компоненты выполнялось условие максимума ДЭ, можно значительно улучшить пропускание компрессора. Предлагаемый метод можно использовать при разработке широкоапертурных компрессоров. В этом случае при изготовлении решеток большого размера можно оптимизировать ДЭ_{λ_{max}} на краях решетки, которые являются самыми проблемными частями при изготовлении второй дифракционной решетки большой апертуры, и повысить общее пропускание компрессора и лучевую стойкость. Распределение ДЭ решетки с частотой штрихов $1,75 \text{ мкм}^{-1}$ от глубины штриха второй решетки, при которой будет выполняться условие $\{DE(\lambda_{\text{max}})\}(h_2)$ приведено на рис. 2.

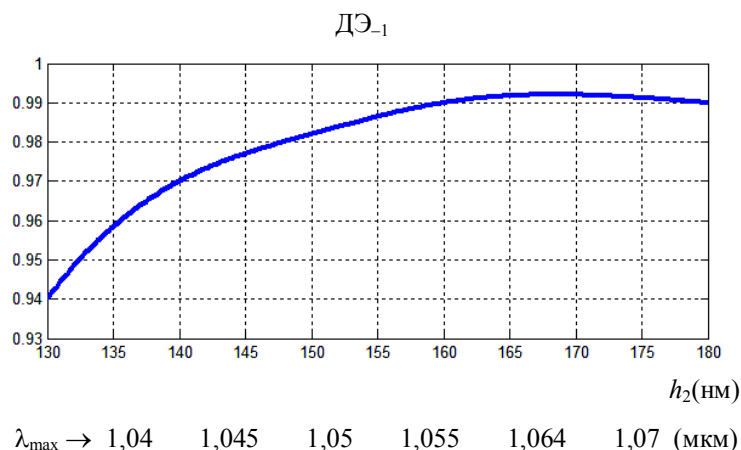


Рис. 2

Выбирая расстояние между решетками, можно задать размер второй решетки и соответствующую неравномерность распределения высоты штриха в направлении, перпендикулярном штрихам по поверхности решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев. И.В. «Стретчеры и компрессоры для сверхмощных лазерных систем». Квантовая электроника» 44, № 5, 2014, p.p. 393-414.
2. Garanin S.G., Belkov S.A., Romanov V.V. // Petawatt laser system for high-speed processes diagnostics in dense hot plasma. International Symposium. Topical problems of nonlinear wave physics (nwp-2014).NWP-2: Lasers with high peak and high average power. Proceedings, p. 122, N. Novgorod, 2014.
3. Belkov S.A., Garanin S.G., Shagalkin Yu.V. «UFL-2M facility - initial steps for construction», ICONO/LAT, 2013, LFB2.
4. Neauport J., Bonod N., Hocquet S. et al., «Mixed metal dielectric gratings for pulse compression», Optics Express 18 (23), 23776-23783 (2010).
5. Skochilov A.F., Lyubimov A.I., Belokopytov A.A., Korennoy K.S. «Laser pulse compression gratings», Proc. of 11 Int. conf. «HoloExpo'2014» (September 2014, Sochi), Moscow, 2014, p.p. 178 -180.
6. Neauport J., Bonod N. «Pulse compression gratings for the PETAL project – A review of various technologies», Proc. of SPIE Vol. 7132, 71320D, 2008.
7. Wang J., Jin Y., Shao J., Fan Z. «Optimization design of an ultrabroadband, high-efficiency, all-dielectric grating», Optics Letters, Vol. 35, No. 2 / January 15, 2010,p.p.187 – 189.

OPTIMIZATION OF COMPRESSED PULSE PARAMETERS IN A GRATING COMPRESSOR

Lyubimov A.I.¹, Romanov V.V.²

(¹ OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan;

² FGUP «RFYaTs VNIIEF», Sarov)

The paper deals with the effect of grating parameters on the compressed pulse, the former including the spectral distribution of the grating diffraction efficiency and nonuniformity of the diffraction efficiency distribution over the grating surface. Until now, various works described the optimization of the

characteristics of only one of all gratings in a compressor, and the rest were considered to be identical to the first one. From the technological point of view, the process of manufacturing two gratings, featuring identical spectral characteristics, comprised in one unit, the size of the second grating being substantially larger, is a real challenge.

The paper describes the optimization of the diffraction efficiency of a grating unit, comprised of two parallel diffraction gratings with different characteristics. Nonidentity of the grating characteristics, used in the unit, makes it possible to increase the unit «transmission». The proposed methods are to be used in two cases. In the first case, they are used for manufacturing large-sized gratings, when these methods help optimize the characteristics at the grating edges, which are the most problematic sections in the process of manufacturing gratings. In the second case, they are used when a small aperture pulse, whose spectral width is wide, is compressed in the compressor.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОАПЕРТУРНОГО ДИФРАКЦИОННО-РЕФЛЕКТОРНОГО ОБЪЕКТИВА

Полящук А.Г., Седухин А.Г.

(Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск)

Для таких приложений, как устройства высокоразрешающей и прецизионной лазерной записи микро- и наноструктур на металлических пленках на оптических подложках [1], представляется перспективной разработка и применение специальных методов и узлов, обеспечивающих сверхострую фокусировку оптического излучения на поверхности указанных пленок. Как было установлено [2], процесс формирования структур с помощью технологии лазерной термохимической записи на металлических пленках типа хрома и титана обладает выраженным пороговым свойством (контрастом), при котором структурные изменения в объеме пленок, при фиксированной линейной скорости записи и времени последующего химического травления, начинают проявляться при превышении определенной критической мощности лазерного излучения. Это свойство может быть эффективно использовано для реализации сверхразрешения, при выборе пороговой мощности порядка 0,3-0,8 от критической (так называемая «запись «верхушкой» лазерного пучка»). Кроме того, при использовании порогового режима записи, допустимые величины побочных максимумов интенсивности функции рассеяния точки фокусирующего лазерного излучения объектива имеют высокие значения, облегчающие, в свою очередь, выбор конструкции самого объектива.

В настоящей работе предложена и проанализированная первая стадия решения указанной задачи по исследованию методов фокусировки лазерного излучения, приближенной оценке размеров области фокусировки, а также выбору конструкции высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива в геометро-оптическом приближении, при его начальной оптимизации с рассмотрением возможных схем сведения оптического пучка. На рис. 1, а, б показаны меридиональные сечения конструкции предложенного объектива, с компьютерной трассировкой хода световых лучей. В первой схеме – фокусировка стигматическая, а во второй – аксиконная, с фокусировкой в осевой отрезок, с равномерной в пределах отрезка интенсивностью на оси и постоянным поперечным размером (диаметром) сфокусированного пятна. Объектив включает в себя расположенные на оптической оси z высокоапертурное вогнутое сферическое зеркало S со внутренним отверстием и центром кривизны O , плоский дифракционный элемент D и преобразователь поляризации пучка T из линейной в радиальную [3]. Половинный апертурный угол сведения светового пучка, θ , был выбран равным нами $\theta = 70^\circ$, а длина волны записываемого пучка $\lambda = 266$ нм. Особенностью данной конструкции является использование кольцевой апертурной функции, с перераспределением энергии падающего на объектив пучка в энергию, сконцентрированную в пределах узкой радиальной области, на входе лучей в сферическое зеркало.

Интересующие нас размеры пространственной области сфокусированного пучка, как известно, могут быть описаны функциями, зависящими от набора лишь нескольких параметров. Так, для параксиального гауссового пучка, с его гомоцентрической фокусировкой, поперечный и продольный размеры данной области [диаметр шейки и конфокальный параметр по уровню интенсивности $\exp(-2)$] определяются, соответственно, как

$$d = 2\lambda/(\pi NA) \quad \text{и} \quad b = 2\lambda/(\pi NA^2), \quad (1)$$

где λ – длина волны;

$$NA = n \sin\theta \quad (2)$$

– числовая апертура; n – показатель преломления среды записи; θ – половинный апертурный угол сведения светового пучка.

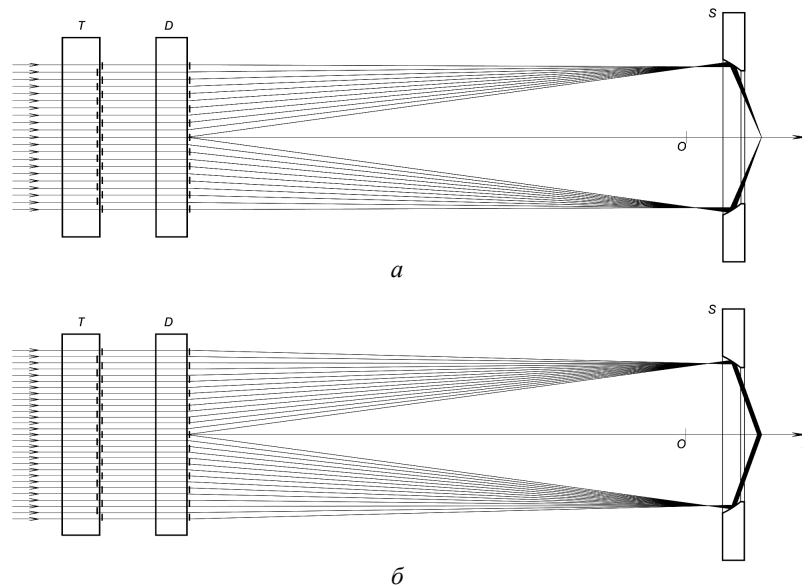


Рис. 1

В первом грубом приближении, указанные формулы применимы и при высокоапертурной фокусировке (при большой числовой апертуре), причем при апертурной функции пучка отличной от гауссовой, в них должен присутствовать также коэффициент формы кольцевой апертуры и поправка на радиальную поляризацию. Подставляя выбранные значения длины волны в формулы (1) и (2), в качестве первого приближения, для гауссовой формы апертуры, $n = 1$ и круговой поляризации записывающего пучка, получим следующую оценку для поперечного и продольного размера, а также числовой апертуры:

$$D = 180 \text{ нм}, \quad b = 192 \text{ нм} \text{ и } \text{NA} = 0,94. \quad (3)$$

Уточнение размеров d и b (с уменьшением d и увеличением b), характерных для схемы на рис 1, a может быть получено при дальнейшем проведении волнового расчета.

Для схемы на рис 1, b , с аксиконной фокусировкой и формированием в области фокусировки пучка с поперечным распределением интенсивности, приближенно описываемым функцией Бесселя, $J_0^2(k\rho \sin \theta)$, при указанной величине $\theta = 70^\circ$ размер d может быть оценен, как [4]

$$d = j_1 \lambda / (\pi \text{NA}) = 217 \text{ нм}, \quad (4)$$

где ρ – радиальная координата; $j_1 \approx 2,405$ – первый ноль функции Бесселя $J_0(\bullet)$ (первого рода и нулевого порядка), а сам размер d , в отличие от формулы (1), определен по первому минимуму функции $J_0(\bullet)$. Для устранения осцилляций интенсивности на оси в пределах рабочего отрезка, в данной схеме может быть применена периферийная фазовая коррекция, описанная в работе [5]. Как следует из приведенных формул, при грубой аппроксимации функций рассеяния треугольными функциями, поперечные размеры центрального максимума по уровню интенсивности 0,5 (FWHM) приближаются к предельной величине порядка половины длины световой волны.

В представленных схемах, при заданном рабочем отрезке объектива порядка 1 – 1,3 мм, половинном апертурном угле $\theta = 70^\circ$, диаметре дифракционного элемента порядка 14 мм и об-

шей длине объектива порядка 60 мм, оптимизации подлежал набор таких параметров, как радиус кривизны зеркала, положения области фокусировки и дифракционного элемента относительно центра кривизны зеркала, угол сведения лучей в меридиональной плоскости (при стигматической фокусировке) и максимально-допустимый аксиальный размер области фокусировки (при аксиальной фокусировке), а также минимальный период зон дифракционного элемента.

Как было установлено, при заданных параметрах и выбранных конструкциях объектива, для первой и второй схем, угол сведения лучей в меридиональной плоскости и максимально-допустимый аксиальный размер сфокусированной области приблизительно составили, соответственно, 4° и 1 мм. Минимальный период зон дифракционного элемента для обеих схем составил 2 мкм (угол дифракции $7,7^\circ$).

Таким образом, показано, что предложенный микрообъектив с $NA = 0,94$ для длины волны 266 нм и его оптимизированные параметры способны удовлетворить условиям сверхразрешающей термохимической записи.

Данная работа поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227, междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН и проектом No 2012-218-03-004 Миннауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полещук А.Г., Корольков В.П., Бессмельцев В.П., Никаноров Ю.Н., Карван А.Л., Верховляд А.Г. Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро и нано-обработки. Тезисы доклада Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2015», Казань (2015).
2. Вейко В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., Саметов А.Р., Шахно Е.А., Ярчук М.В. Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи, Квантовая Электроника, Т. 41. № 7. С. 631-636 (2011).
3. Beresna M., Gecevičius M., Kazansky P.G., and Gertus T. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass, Appl. Phys. Lett. Vol. 98. P. 201101 (2011).
4. Sedukhin A.G. Beam-preshaping axicon focusing, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 15. P. 3057-3066 (1998).
5. Sedukhin A.G. Marginal phase correction of truncated Bessel beams, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 17, p. 1059-1066 (2000).

OPTIMIZATION PARAMETERS HIGH-TEMPERATURE DIFFRACTIVE LENS REFLEX

Polishchuk A.G., Sedukhin A.G.

(Institute of Automation and Electrometry, Siberian RAS, Novosibirsk)

Abstrakt

The choice of the constructions of a high-aperture diffractive-reflective lens objective is performed alongside with consideration of stigmatic and axicon focusing, making computer ray-tracing, and optimization of parameters of the objective, as applied to the process of a high-resolution thermochemical laser recording on metal films. It was shown that the proposed objective is distinguished by simplicity of its construction and, for a given half-aperture angle of focusing equal to 70° and the operating wavelength of 266 nm, it is capable of providing the transverse size of the focal spot close to a half of the wavelength at half intensity.

ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА ПЕРСПЕКТИВНОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ РЕЖИМ БЕСЩЕЛЕВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В УФ-ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Скочилев А.Ф., Белокопытов А.А.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

ООО «НПП ДАУРИЯ», входящая в холдинг первой в России частной компании «ДАУРИЯ Аэропейс», основными видами деятельности которой являются разработка, изготовление и эксплуатация космических аппаратов, в настоящее время разрабатывает оптико-электронный прибор – блок камеры поля (БКП), предназначенный для проведения съемки космических тел в ультрафиолетовом диапазоне спектра, который входит в состав комплекса научной аппаратуры перспективной международной космической обсерватории.

БКП обеспечивает распределение, усиление и фильтрацию по спектральному диапазону светового потока, идущего от телескопа, а также его первичную обработку при помощи детекторов ультрафиолетового излучения. В своем составе БКП имеет два оптических канала, которые предназначены для работы с дальним и ближним УФ излучением в режимах визуализации (съемки изображения звезд) и спектроскопии.

Оптические схемы каналов включают в себя различные оптические элементы: сферические и асферические зеркала, спектральные светофильтры и дифракционные решетки. ОАО «НПО ГИПО» принимает участие в изготовлении как асферических зеркал, так и дифракционных решеток для режима бесщелевой спектроскопии.

Канал дальнего ультрафиолета рассчитан на прием оптической информации от телескопа в диапазоне длин волн от 115 до 175 нм, а канал ближнего ультрафиолета – в диапазоне длин волн от 185 до 320 нм.

Смена режимов работы БКП осуществляется за счет применения в устройстве шестигранного кронштейна, на который устанавливаются два зеркала, предназначенные для работы каналов дальнего и ближнего УФ в режиме съемки, две дифракционные решетки (G140L и G230L), которые задействованы в режимах бесщелевой спектроскопии, и два зеркала, необходимые для проведения режима калибровки детекторов от УФ лампы.

Разработанная для БКП решетка G140L имеет частоту 450 лин/мм (период $\Lambda = 2222,222$ нм), а решетка G230L – 250 лин/мм (период $\Lambda = 4000$ нм). Угол падения на решетку G140L равен $5,679^\circ$, а на решетку G230L – $5,838^\circ$. Подложкой для решеток служит материал Zerodur, на который наносится слой алюминия и защитное покрытие из MgF_2 толщиной $d = 150$ нм.

В работе был произведен расчет дифракционной эффективности (ДЭ) предполагаемых для изготовления решеток, определяемой как отношение потока энергии монохроматического света, дифрагированного в первый порядок дифракции, к потоку энергии падающего на решетку излучения. Как известно, ДЭ зависит как от материала отражающего слоя и защитного покрытия, так и формы профиля штрихов решетки.

Показатели преломления и коэффициенты поглощения алюминия и MgF_2 , необходимые для расчета ДЭ, были взяты из [1]. Расчет ДЭ для неполяризованного оптического излучения проведен на основе строгого решения уравнений Максвелла численными дифференциальными методами [2-4].

Расчет ДЭ для синусоидальной формы штриха решетки, характеризуемой высотой h , произведен для случаев, когда форма внешней поверхности защитного покрытия повто-

ряет профиль алюминиевой решетки (оптимальные высоты профиля: $h = 42$ нм для решетки G140L; $h = 68$ нм для решетки G230L) и когда внешняя поверхность защитного покрытия является плоской. Показано, что значения ДЭ обеих решеток падают в коротковолновой части соответствующих спектральных диапазонов при плоской внешней поверхности защитного покрытия. Для того чтобы «выровнять» кривые ДЭ в этом случае, нужно уменьшить высоту профиля алюминиевой решетки до значения $h = 25$ нм для решетки G140L и до значения $h = 43$ нм для решетки G230L. Однако значения ДЭ будут все равно меньше, чем для случая, когда внешняя поверхность защитного покрытия повторяет профиль алюминиевой решетки.

Аналогичные зависимости ДЭ решеток G140L и G230L для прямоугольного профиля штриха высотой h , а также для треугольного профиля штриха (эшелет) с углом блеска α имеют те же особенности, что и для синусоидального профиля штриха, т.е. более высокие значения дифракционной эффективности получаются для случая, когда внешняя поверхность защитного покрытия повторяет профиль алюминиевой решетки. Для этого случая оптимальные высоты прямоугольного профиля: $h = 42$ нм для решетки G140L и $h = 68$ нм для решетки G230L, а для эшелетов оптимальные углы блеска: $\alpha = 1,8^\circ$ для решетки G140L и $\alpha = 1,7^\circ$ для решетки G230L.

Эшелеты имеют дифракционную эффективность значительно выше (порядка 80%), чем у симметричных решеток с прямоугольным профилем (порядка 35%). Однако могут возникнуть определенные трудности при нарезании эшелетов с углом блеска менее двух градусов.

Другим недостатком нарезных решеток является наличие ложных спектральных линий («духов») и значительного рассеянного света. Поэтому использование голографических решеток с синусоидальным профилем штрихов (ДЭ порядка 31%) может оказаться более предпочтительным, поскольку они не дают рассеянного света и не имеют «духов», хотя и обладают более низкой дифракционной эффективностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marvin J. Weber* «Handbook of Optical Materials», CRC Press, 2003.
2. *Lifeng Li*. «Multilayer-coated diffraction gratings: differential method of Chandezon et al. revisited», J. Opt. Soc. Am. 11. P. 2816-2828 (1994).
3. *Lifeng Li, Granet G., Plumey J.P., and Chandezon J.* «Some topics in extending the C method to multilayer gratings of different profiles», Pure Appl. Opt. 5. P. 141-156 (1996).
4. *Lyndin N., Parriaux O. and Tishchenko A.V.* «Modal analysis and suppression of the FMM instabilities in highly conductive gratings», J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 24. № 12. P. 3781 (2007).

DIFFRACTION GRATINGS FOR AN ELECTRO-OPTICAL DEVICE TO BE MOUNTED AT AN ADVANCED INTERNATIONAL SPACE OBSERVATORY, PROVIDING CONDITIONS OF SLITLESS SPECTROSCOPY IN THE UV SPECTRAL REGION

Skochilov A.F., Belokopytov A.A.

(OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan)

Limited Liability Company «NPP DAURIA», being part of the holding company of the first Russian private company «DAURIA Aerospace», develops an electro-optical device – a field camera

unit, designed to survey astronomical bodies in the UV spectral region, comprised in the scientific equipment facility of an advanced international space observatory.

The optimal profiles of diffraction gratings have been studied, they provide for maximal values of the diffraction efficiency for the channels of the far ultraviolet (from 115 nm to 175 nm) and the near ultraviolet (from 185 nm to 320 nm). The diffraction efficiency of gratings has been calculated on the basis of a rigorous solution of the Maxwell equations by numerical differential methods for the nonpolarized optical radiation and for the case of three types of groove profiles (sinusoidal, rectangular and triangular shapes). There have been analyzed some cases when the shape of the external surface of the protective coating retraces the grating profile and when the external surface of the protective coating is flat.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОННЫХ ДВУМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Ручкина М.А., Жердев А.Ю., Одинокоев С.Б.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

Плазмонные спектральные фильтры входят в состав нового класса широкополосных оптических фильтров, в которых ширина полосы зависит от падающего света. В данной работе рассматриваются результаты предыдущих работ [1], где анализировались одномерные периодические структуры с субмикронным периодом и нанометровой высотой рельефа (рис. 1). На рис. 2 представлены экспериментальные исследования. В основе анализа лежит метод Фурье-мод.

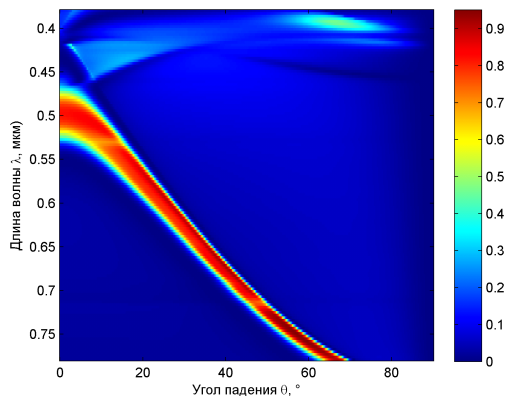


Рис. 1. $\theta\lambda$ -диаграмма в 0-м порядке дифракции



Рис. 2. Вид структуры в пропускающем свете

Считается, что плазмонные оптические структуры (ПОЭ) на основе двумерных плазмонных структур с высокой частотой периода обладают выделенным направлением интенсивной дифракции света, что отвлекает наблюдателя от основного визуального эффекта и делает ПОЭ очень похожими на защитные голограммы. Предполагается, что ПОЭ на основе ДПС с высокой частотой будет либо не обладать дифракционным изображением, либо визуализировать дифракционное изображение во всех угловых направлениях наблюдения.

Поскольку цвета и интенсивность визуального плазмонного эффекта зависят от формы профиля рельефа, то исследовались ПДР на наличие плазмонного эффекта в проходящем и отраженном свете. Исследовались ДПС, а именно два типа: структуры с стержнями (Step) и структуры с отверстиями (Hole). Диапазон исследуемых периодов от 200 до 1500 нм, напыления Me от 20 до 100 нм, напыление Me на структуру рассматривалось как со стенками, так и без, в качестве подложки использовались воздух или стекло BK7 (рис. 3).

На основании расчетов, проведенных в математической среде MATLAB выявлено, что оптимальным периодом, обладающим наиболее выраженной дифракционной интенсивностью в первых и вторых отраженных и прошедших порядках дифракции, является период 600 и 400 нм.

Ниже представлены зависимости спектрально-угловых характеристик от высоты напыления металла со стенок на структуру, равными толщине напыления; структура «нано-стержни» с периодом 600 нм на подложке из стекла BK7 в «-1» порядке дифракции. С увеличением толщины слоя металла наблюдается увеличение дифракционной интенсивности.

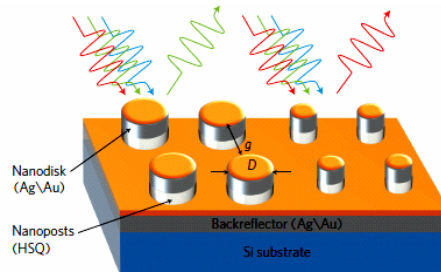
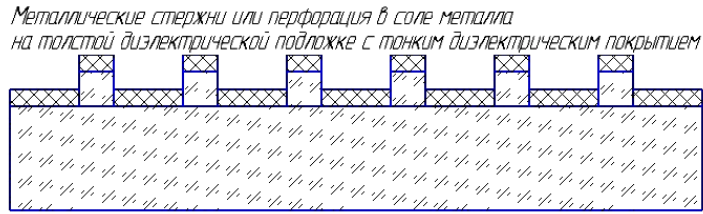


Рис. 3. Изображение ДПС

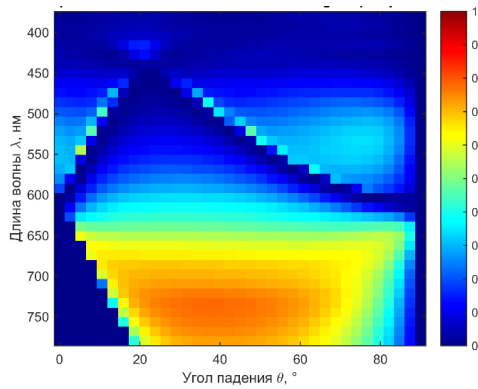


Рис. 4. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 100 nm

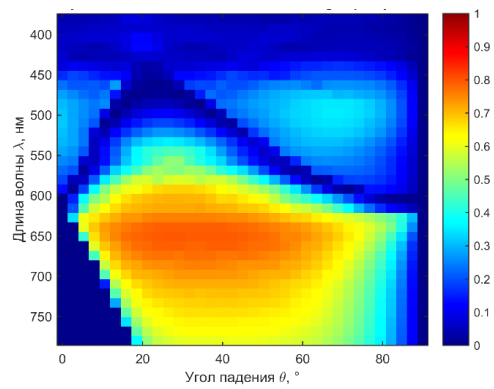


Рис. 5. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 80 nm

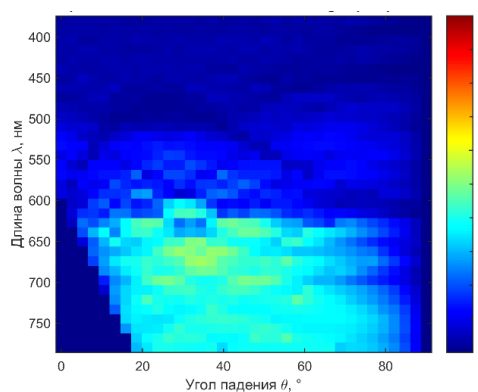


Рис. 6. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 20 nm

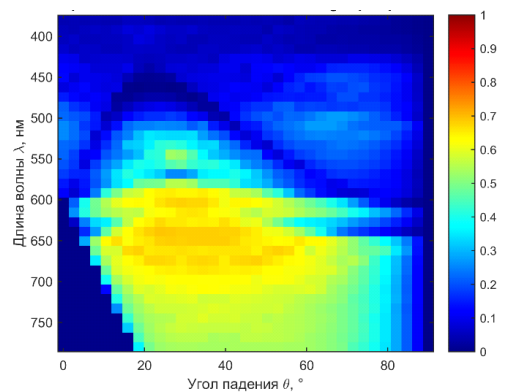


Рис. 7. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 40 nm

Ниже представлены зависимости спектрально-угловых характеристик от высоты напыления металла со стеночками на структуру, равными толщине напыления; структура «наностержни» с периодом 600 нм на подложке из стекла BK7 в «-1» порядке дифракции. Сравниваются структуры «со стеночками» и «без стеночек».

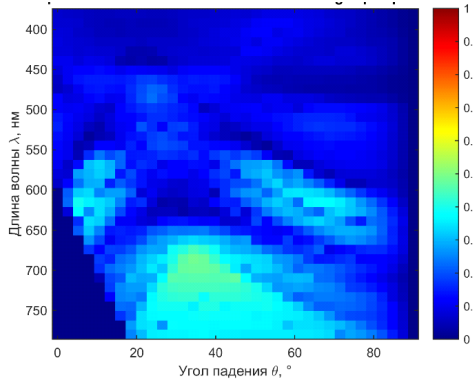


Рис. 8. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 60 nm, без стенок

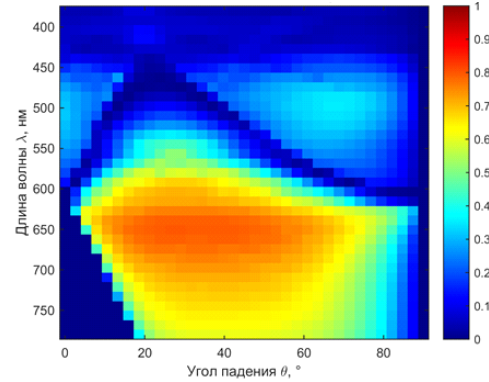


Рис. 9. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 100 nm, со стеночками

Рассмотрим период 400 нм.

Ниже представлены зависимости спектрально-угловых характеристик от высоты напыления металла без стенок на структуру; структура «нано-стержни» с периодом 400 нм на подложке из стекла ВК7 в «-1» порядке дифракции. С увеличением толщины слоя металла наблюдается увеличение дифракционной интенсивности.

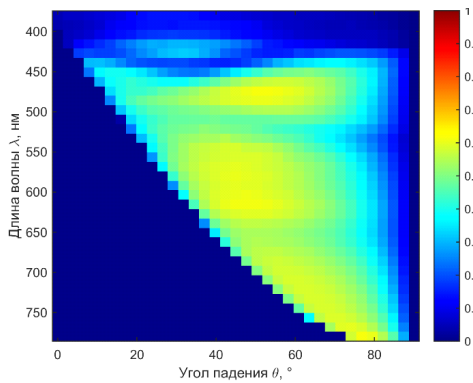


Рис. 10. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 100 nm

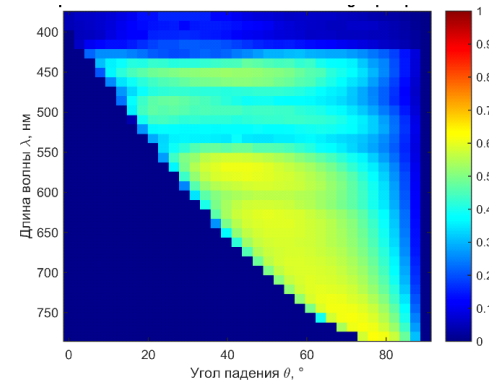


Рис. 11. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 80 nm

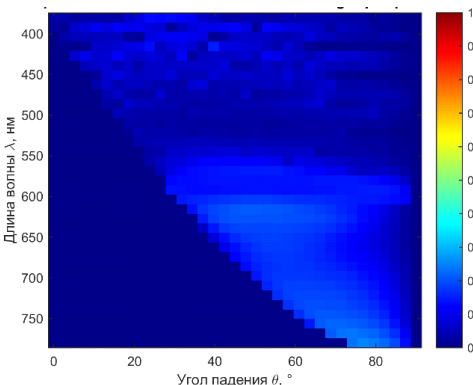


Рис. 12. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 20 nm

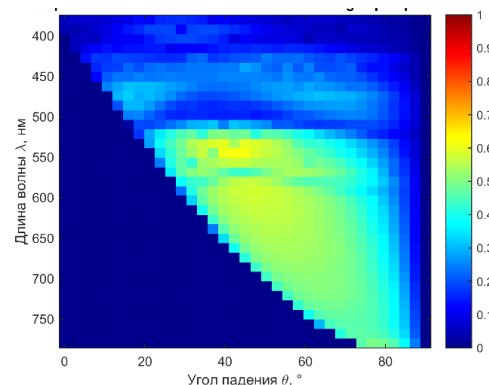


Рис. 13. $\theta\lambda$ -диаграмма в R-1 порядке дифракции, Ag = 60 nm

Планируются дальнейшие исследования различных конфигураций ДПС и опытных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Odinokov S.B.*, *Lushnikov D.S.*, *Zherdev A.Yu.*, *Ruchkina M.A.*, *Bezus E.A.*, *Doskolovich L.L.*, *Smirnov A.V.* *** «Plasmonic Spectral Filters Based On One-Dimensional Periodic Structures», *Spie Proceedings 2015** Bauman Moscow State Technical University, ** *Image Processing Systems Of The Russian Academy Of Sciences*, ** *Technical Cybernetics Department, Samara State Aerospace University*, *** *Research-Production Association «Krypten»*.
2. *Fu L.*, *Schweizer H.*, *Weiss T.*, and *Giessen H.* «Optical properties of metallic meanders». *J. Opt. Soc. Am. B. Vol. 26. Pp. B111–B119 (2009)*.
3. *Ozaki M.*, *Kato J.*, *Kawata S.* «Surface-plasmon holography with white light illumination». *SPIE Proceedings, vol. 8455, p. 84550K-6 (2012)*.
4. *Shokooh-Saremi M.* «Properties of two-dimensional resonant reflectors with zero-contrast gratings» / *M. Shokooh-Saremi, R. Magnusson // Opt. Lett. – 2014. – Vol. 39. – Pp. 6958–6961.*
5. *Boonruang S.* «Multiline two-dimensional guided-mode resonant filters» / *S. Boonruang, A. Greenwell, M.G. Moharam // Appl. Opt. – 2006. – Vol. 45. – Pp. 5740–5747.*

SPECTRAL AND ANGULAR CHARACTERISTICS OF TWO-DIMENSIONAL PLASMON DIFFRACTION GRATINGS RESEARCH

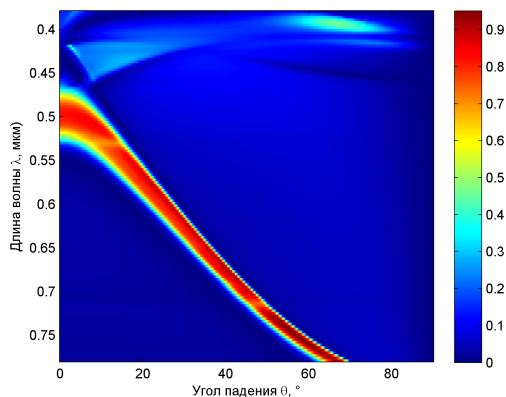
Ruchkina M.A., Zherdev A.Yu., Odinokov S.B.

(MSTU. N.E. Bauman, Moscow)

Plasmon spectral filters is a new class of broad-band optical filter in which the bandwidth depends on the incidence angle of light. In this paper we report theoretical and experimental results of the analysis of one-dimensional periodic structures with submicron period and nanometric height using the Fourier modal method.

In this paper we used the Fourier modal method for the analysis of diffraction gratings [2] to obtain the plasmonic spectral filters. The Fourier modal method allows us to carry out the solution of the direct problem of diffraction of electromagnetic wave at a one-dimensional periodic structure with a multilayer coating. This objective is achieved by solving Maxwell's equations for the electromagnetic radiation transmitted and reflected by the diffraction grating with a multilayer coating. Theoretical studies confirmed by obtaining of experimental samples.

The purpose of research is to achieve broadband spectral filter based on plasmonic grating with a spectral bandwidth depending on the angle of propagation of radiation.

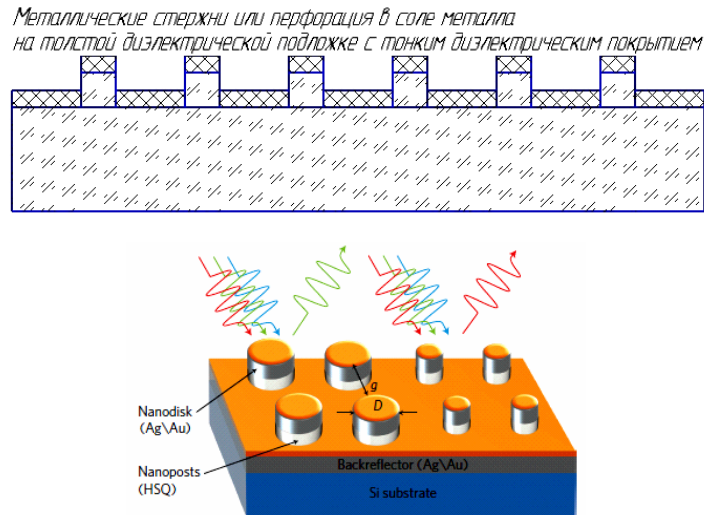


Picture 1. $\theta\lambda$ -diagram for structure transmittance



Picture 2. View of structure samples in transmitted light

It is believed that the structure of the optical plasmon elements (POE) based on two-dimensional plasmon (TDP) structures with a high frequency period have preferred direction intense diffraction of light that distracts the observer from the main visual effect and makes POE very similar to the protective holograms. It is assumed that POE based on TDP with high frequency will not have any diffraction image or it will visualize in all angular directions of observation.



Picture 3. Two-dimensional plasmon grating illustration

REFERENCES

1. *Odinokov S.B.**, *Lushnikov D.S.**, *Zherdev A.Yu.**, *Ruchkina M.A.**, *Bezus E.A.****, *Doskolovich L.L.****, *Smirnov A.V.**** «Plasmonic Spectral Filters Based On One-Dimensional Periodic Structures», *Spie Proceedings 2015** Bauman Moscow State Technical University, ** Image Processing Systems Of The Russian Academy Of Sciences, ** Technical Cybernetics Department, Samara State Aerospace University, *** Research-Production Association «Krypten».
2. *Fu L.*, *Schweizer H.*, *Weiss T.*, and *Giessen H.* «Optical properties of metallic meanders». *J. Opt. Soc. Am. B.* Vol. 26. Pp. B111–B119 (2009).
3. *Ozaki M.*, *Kato J.*, *Kawata S.* «Surface-plasmon holography with white light illumination». *SPIE Proceedings*, vol. 8455, p. 84550K-6 (2012).
4. *Shokooh-Saremi M.* «Properties of two-dimensional resonant reflectors with zero-contrast gratings» / M. Shokooh-Saremi, R. Magnusson // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – Pp. 6958–6961.
5. *Boonruang S.* «Multiline two-dimensional guided-mode resonant filters» / S. Boonruang, A. Greenwell, M.G. Moharam // *Appl. Opt.* – 2006. – Vol. 45. – Pp. 5740–5747.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ГОЛОГРАММ

Сафина Д.М., Царева А.М., Гайфуллин Б.Р., Макаева Р.Х.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Голография является одним из самых интересных научных направлений, так как она позволяет получать объёмное изображение предмета [1]. Запись голографического изображения основана на законах интерференции. Зарегистрированная на фотопластинке интерференционная картина, образованная волной, отражённой от предмета и дополнительной (опорной) волной, после проявления представляет собой голограмму. Полученная картина имеет вид своеобразной дифракционной решётки. Период этой решётки можно измерить только, используя микроскоп. На рис. 1 показана фотография отснятой голограммы.

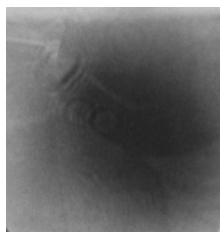


Рис. 1. Вид проявленной голограммы

Тёмные кольца и полосы, наблюдаемые на фотопластинке, к записи голограммы не имеют отношения – это результат дифракции световых волн на пыли.

Процесс восстановления изображения предмета основан на законах дифракции. Для этого необходимо голограмму осветить пучком (опорным), подобным тому, который использовался при записи. Опорная волна дифрагирует на голограмме. В результате чего образуются несколько дифракционных пучков. Как правило, рассматривают только три. Один из них – пучок нулевого порядка – пройдет через голограмму без изменения направления. Два других – пучки ± 1 -го порядка отклонятся в разные стороны относительно пучка нулевого порядка на углы, зависящие от шага дифракционной решетки – голограммы.

Один из отклоненных пучков формирует копию первичного волнового фронта, отражённого от предмета. Это – мнимое изображение предмета. По зрительному восприятию оно обладает свойствами объёмности и располагается в том же месте по отношению к голограмме, где помещался объект при регистрации голограммы. Поэтому создаётся впечатление полного присутствия предмета.

Другой пучок формирует действительное изображение предмета, которое «зависает» по другую сторону голограммы. Изображение получается искажённым и обладает, как говорят, свойствами псевдоскопичности. Во внимание это изображение не принимается.

Голограмма несет информацию об объёмности объекта, так как она фиксирует информацию и об амплитуде отражённой от предмета волны, и о распределении фаз предметной волны относительно фаз опорной волны [2].

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований некоторых свойств голограмм.

Первое свойство – объёмность изображения – демонстрируется на голограмме, зарегистрированной по схеме Ю.Н. Денисюка (рис. 2) [3]. Такие голограммы способны восстанавливать изображение в лучах обычного точечного источника белого света. Поворотом пластины относительно точки наблюдения, можно рассмотреть записанную фигуру античной девушки: увидеть её лицо и в профиль, и анфас (рис. 2, *а*, *б*). Наклонив, голограмму можно увидеть ту часть фигуры (рис. 2, *в*), которая не поместилась бы на фотографии такого же формата.

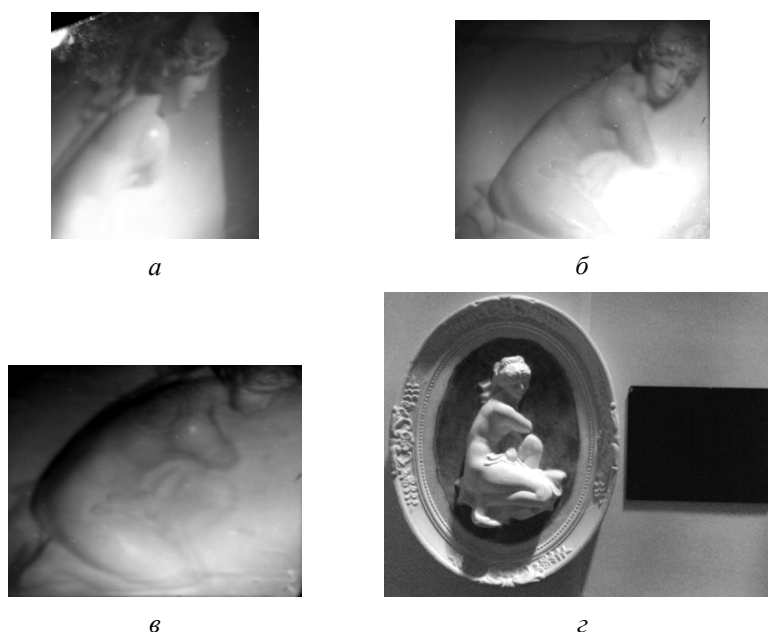


Рис. 2. Голографические изображения фигуры античной девушки (*а*, *б*, *в*) и сравнительные размеры барельефа и фотопластинки (*z*)

На рис. 3 представлены результаты исследования другого свойства голограммы. На одну и ту же фотопластинку были записаны несколько изображений. Изменяя угол падения опорного пучка относительно предметного, на одной голограмме были записаны три экспозиции: ансамбль из трёх фарфоровых фигур (рис. 3, *а*), двух фигур (рис. 3, *б*), и одной фигуры (рис. 3, *в*). При повороте пластинки на восстановленной голограмме последовательно появлялись эти записанные изображения.

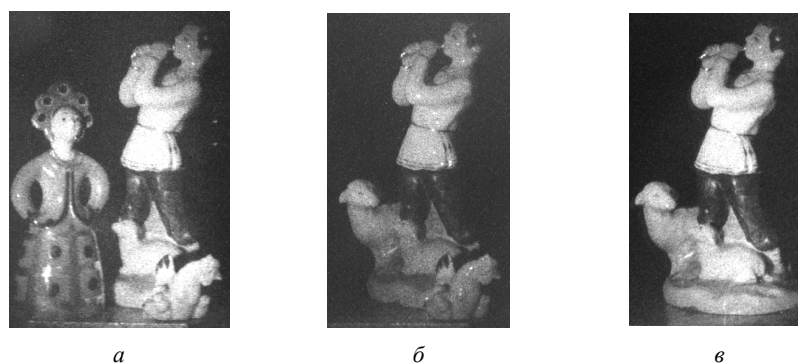


Рис. 3. Фотографии трёх экспозиций одной голограммы

Экспериментально исследовалось самое интересное свойство голограммы: сохранение полной информации каждым отдельно взятым её участком. Интерференционная картина в каждой точке голограммы формируется светом, рассеянным всеми точками предмета. Поэтому любой участок голограммы содержит информацию обо всем предмете и позволяет восстановить его полное изображение.

Предметом исследования была выбрана фарфоровая статуя мальчика-пастушка (рис. 4, а). Голограмму разбили на два кусочка. На рис. 4, б показана верхняя часть голограммы – меньший кусочек. Объектив фотоаппарата сфокусирован на стекле. Виден обломок стекла треугольной формы.



Рис. 4. Иллюстрация одного из свойств голограммы

На рис. 4, в представлена фотография фрагмента голографического изображения верхней части предмета. Объектив сфокусирован на предмете, поэтому край стекла видится размытым, нерезким. Далее, изменяя угол наблюдения изображения (ракурс), зафиксировали следующий фрагмент предмета – его среднюю часть (рис. 4, з). Еще раз изменили положение фотоаппарата, как бы заглянули вглубь пластинки и увидели нижнюю часть предмета (рис. 4, д). Итак, для того, чтобы увидеть полное изображение предмета, необходимо рассматривать этот участок под разными углами зрения. Следует отметить, что качество полученного изображения сохранилось.

С появлением голографии расширилась область практического использования волновых явлений, что способствовало появлению новых научных направлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франсон М. Голография. М.: Мир, 1972. 245 с.
2. Вьено Ж.Ш., Смигельский П., Руайе А. Оптическая голография: пер. с франц. – М.: Мир, 1973. – 212 с.
3. Островский Ю.И. Голография и её применение. – Л.: Наука, 1973. –180 с.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROPERTIES OF HOLOGRAMS

Safina D.M., Tsareva A.M., Gaifullin B.R., Makaeva A.D.

*(Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev (KNRTU-KAI), Kazan)*

The report visibly shows the results of experimental studies of certain properties of holograms: the volumetric images, the ability to record multiple images of the subject on one hologram. Also studied experimentally and shown in the pictures one of the interesting properties is the preservation of the full information to each specific area of the hologram.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Гаранин А.И., Конин Ю.А., Перминов А.В.

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь)

Развитие технологии изготовления оптических волокон вызвало необходимость создания аппаратуры и методик для контроля качества световодов в процессе их изготовления и эксплуатации. Основными параметрами, подлежащими контролю, являются: диаметр волокон, натяжение при вытягивании волокон, температура в зоне формирования волокна, распределения показателя преломления в готовых волокнах.

Очень эффективными в дефектоскопии прозрачных объектов являются когерентно-оптические методы. В данных методах для анализа объекта используются два волновых фронта, объектный и опорный. Один из пучков пропускается через объект, а другой идет без изменений, далее пучки интерферируют на экране. Среди когерентно-оптических методов наиболее известен метод голографической интерферометрии. В данном методе происходит сравнение эталонной голограммы объекта с голограммой нагруженного объекта, что позволяет визуализировать напряжения, области сжатия или расширения и структуру нагруженного объекта.

Исследование проводилось на лабораторной голографической установке, в комплект которой входят плоское зеркало, светоделительная пластина, GeNe лазер мощностью 1 мВт и излучением с длиной волны 633 нм, сферические линзы для расширения световых пучков, держатели образцов и фотоматериалов.

Первым объектом для исследований в нашей работе послужило сварное соединение одномодового оптического волокна.

Сварное соединение двух однотипных волокон перед голографированием было сфотографировано при двадцатикратном увеличении через оптический микроскоп. Фотография сварного соединения приведена на рис. 1.

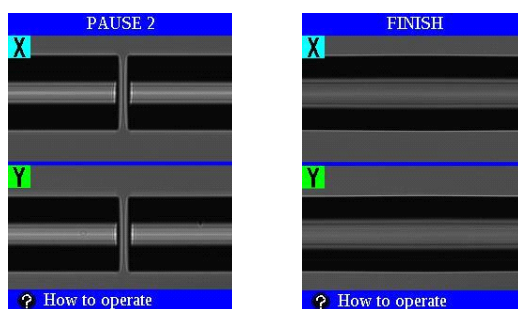


Рис. 1. Фотография сварного соединения, вид из камеры сварочного аппарата Fujikura FSM-100p

На рис. 1 в области соединения волокон видно слабо-различимое размытое темное пятно диаметром примерно 20 мкм, которое указывает на возникшие в результате сварки неоднородности среды. Однако, обычные оптические наблюдения, даже при многократном увеличении, не дают четкой информации, например, об истинных размерах, возникающей при сварке волокна области оптической деформации.

На следующем этапе эксперимента производилась голографирование сварного соединения (рис. 2, рис. 3).

Видно, что в области сварного соединения волокон существенно нарушена однородность оптических свойств волокна (в случае фазовой голограммы фиксируется неоднородность показателя преломления).

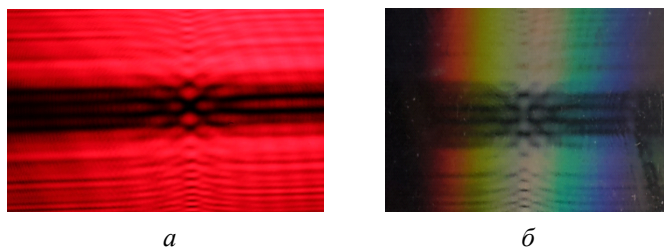


Рис. 2. Интерферограмма (а) и восстановленная в белом свете голограмма (б) сварного соединения при четырехкратном увеличении, границы волокна выделены штрихом

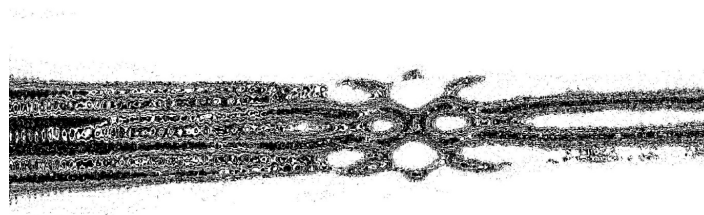


Рис. 3.Изображение сварного соединения, восстановленное через алгоритм преобразования Френеля

Таким образом, голографический метод позволяет быстро и точно определять положение, размеры и характер дефектов в оптическом волокне, толщина которого не превышает 100 мкм, и не требует использования оптических приборов (микроскопов) с высокой степенью разрешения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках научного проекта №14-42-08009 р_офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital Holographic Microscopy. A New Method for Surface Analysis and Marker-Free Dynamic Life Cell Imaging/Вјцн Kemper, Patrik Langehanenberg, Gert von Bally//Optik & Photonik. – 2007. – № 2. С. 41-44.
2. Schnars U., Jupter W. Digital holography. // Springer Verlag. – 2005.
3. Миронова Т.В. Анализ деформаций, оптических неоднородностей и дисторсионных искажений с помощью искусственных спеклов в цифровой фотографии. – 2012.
4. Цифровая голографическая интерферометрия микродеформаций рассеивающих объектов / О.В. Диков*, С.А. Савонин, В.И. Качула, О.А. и др.// Известия Саратовского университета. – 2012. Т. 12. Сер. Физика, вып. 1.
5. Handheld and low-cost digital holographic microscopy/Atsushi Shiraki, Yusuke Taniguchi, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito//physics.optics. – 2012.
6. Multi-view and multi-resolution real-time digital holographic microscopy/Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito//Microscopy: Science, Technology, Applications and Education. – 2010.

QUALITY CONTROL OF OPTICAL FIBERS AND PREFORMS BY DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

Garanin A.I., Konin Yu.A., Perminov A.V.

(State Tomsk University, Tomsk)

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Черных В.Т.,¹ Черных Д.А.²

¹ Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ);

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Применение когерентного лазерного излучения в двулучевых интерферометрах типа Маха – Цендера, Майкельсона, Пвайнана – Грина [1, 2] и других ограничивается собственно высоким качеством элементов оптических систем. За счет большой длины когерентности лазерного излучения коллимированный пучок, прошедший сквозь плоскопараллельную пластину, преобразуется в два пучка. Один пучок является прямошедшим, а второй образован после первого внутреннего отражения в пластине. Оба эти пучка сдвинуты друг относительно друга, а также могут образовывать угол между собой. Последнее определяется углом клиновидности плоскопараллельной светоделительной пластины. В области переналожения этих пучков образуются интерференционные полосы, которые собственно являются «фоновыми» полосами. Эти «фоновые» полосы присутствуют в пучках обеих ветвей интерферометра. В плоскости наблюдения интерферограммы исследуемого объекта налагаются пучки такой сложной структуры распределения освещенности. За счет «фоновых» полос на интерферограмме имеет место перераспределение освещенности в полосах, а также наблюдаются разрывы полос, что затрудняет расшифровку интерферограмм и их интерпретацию. По этой причине классические интерферометры практически не используются с лазерным источником излучения.

С другой стороны, указанные выше интерферометры трудоемки в юстировке и настройке их оптических систем. Не совсем очевидна возможность их использования в учебно-демонстрационных целях по наблюдению интерференционных явлений.

В докладе представлена разработка лазерного двухлучевого интерферометра [1, 2]. В качестве основного светоделительного элемента в оптической системе интерферометра используется дифракционная решетка с частотой штрихов равной 300 мм^{-1} .

Принцип действия лазерного интерферометра состоит в следующем (рис. 1).

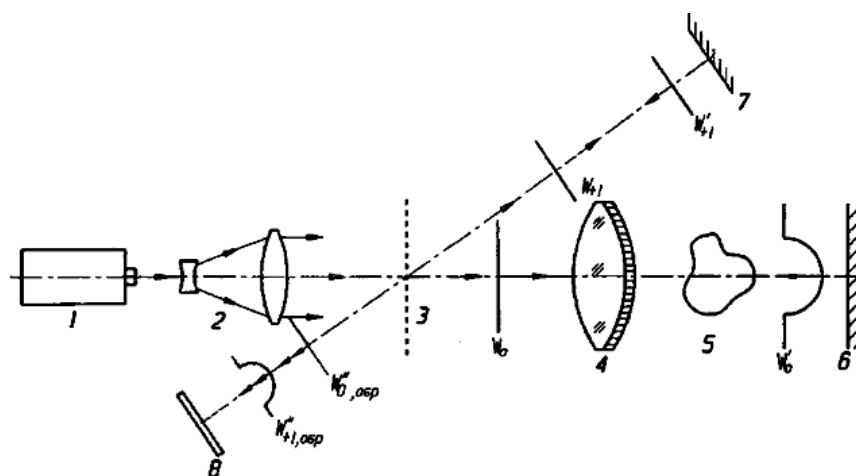


Рис. 1

Пучок когерентного излучения от He – Ne лазера 1 поступает в коллиматор 2, состоящий из двух оптических элементов. На выходе коллиматора формируется пучок параллельных световых лучей. Далее световой пучок поступает на дифракционный элемент 3. В качестве дифракционного элемента используются нарезная дифракционная решетка. На выходе элемента 3 образуются дифрагированные пучки нулевого W_0 и высших порядков дифракции. Для простоты рассмотрения принципа получения интерферограммы на схеме изображены только нулевой W_0 и плюс первый порядок дифракции W_{+1} . Световой пучок W_0 выполняет роль объектного пучка, а пучок W_{+1} – является опорным пучком при рассмотрении их в прямом ходе сквозь дифракционный элемент. Далее объектный пучок W_0 проходит сквозь проекционный объектив 4, исследуемый фазовый объект 5 и падает по нормали на поверхность зеркала 6.

Отраженный от зеркала 6 объектный пучок W_0' распространяется в обратном ходе через фазовый объект 5, оптическую систему 4 и падает на дифракционный элемент 3. В результате дифракции пучка W_0' на элементе 3 образуются два пучка: один пучок распространяется в направлении коллиматора 2 (нулевой порядок дифракции), а второй $W_{+1обр.}$ дифрагирует в направлении плюс первого порядка обратного хода относительно пучка W_{+1} . Объектный пучок $W_{+1обр.}$ несет информацию об исследуемом фазовом объекте 5.

Опорный пучок W_{+1} достигает плоского зеркала 7 и отражается от ее поверхности. Отраженный пучок W_{+1}' распространяется в обратном ходе и поступает в плоскость дифракционного элемента 3. За счет дифракции пучка W_{+1}' на элементе 3 образуются два дифрагированных пучка: один пучок дифрагирует в направлении противоположном пучку W_0 и является в данном случае первым порядком дифракции. Второй – прямопрошедший пучок $W_{0,обр.}$ является пучком нулевого порядка. Этот пучок имеет плоский волновой фронт и выполняет роль опорного (эталонного) пучка. Пучок $W_{0,обр.}$ распространяется в направлении дифрагированного объектного пучка $W_{+1обр.}$. При суперпозиции пучков $W_{+1обр.}$ и $W_{0,обр.}$ в плоскости 8 наблюдают двухлучевую интерферограмму исследуемого объекта 5.

Использование в интерферометре когерентного лазерного излучения упрощает управление настройкой интерферометра как на полосу бесконечной ширины, так и на полосы конечной ширины – различной ширины и ориентации. Управление настройкой лазерного интерферометра осуществляется посредством одного оптического элемента – зеркала 7, снабженного рабочими подвижками для поворота его вокруг горизонтальной и вертикальной осей.

Принципиальная схема оптической системы лазерного интерферометра содержит минимальное число оптических элементов, что позволяет создавать макеты приборов для учебно-демонстрационных применений. Следует отметить, что требования к качеству поверхностей оптических элементов лазерного интерферометра остаются такими же высокими, как и при создании классических интерферометров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных В.Т. Автореферат канд.диссерт., к.ф-м.н. – Томск, 1984. 28 с.
2. Оптический производственный контроль, под ред. Д. Малакары, – М., Машиностроение, 1985. С. 42-43.
3. Черных В.Т., Черных Г.С. Лазерный интерферометр. Патент на полезн. мод. №140586 от 27.12.13 г. Бюл., № 13. 2014.
4. Черных В.Т., Черных Г.С. Способ получения интерферограмм в когерентном свете. Патент на изобретение № 2548935 от 17.12.13 г. Бюл., № 11. 2015 г.

LASER INTERFEROMETER

Chernykh V.T.,¹ Chernykh D.A.²

(¹ Kazan State Power Engineering University (KSPEU);

² KNRTU-KAI named after A.N. Tupolev, Kazan)

The paper discloses a double-beam laser interferometer in which the formation of two interfering beams - and the reference object is performed by means of a diffraction element such as a diffraction grating. Interferogram phase object is obtained in the observation plane (registration) with the superposition of the object and reference beams formed by the diffraction beams of zero and first orders in the opposite course through the diffraction element. For precise contours of the object and the borders of the inhomogeneity in the object beam a lens, conjugating the object plane and the plane of the interferogram registration.

Changing the settings of the laser interferometer, and the width and orientation of the stripes on the interferogram is achieved by changing the angle between the interfering object and reference beams. This operation is performed by a single interferometer optical element reference branch of the interferometer, without causing misalignment of the optical system of the device itself as a whole.

СВЕТОДИОДЫ – МИНИАТЮРНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ С ГОЛОГРАММ

Черных В.Т., Борисов А.Н.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Светодиодные источники излучения нашли широкое применение при создании светильников, рекламного дизайна, в передаче информации в форме бегущей строки и других назначениях. При этом при выборе светодиодного источника света важной характеристикой является его максимальная излучательная способность. Светодиоды, характеризующиеся максимальной излучательной эффективностью, являются привлекательными источниками света для создания миниатюрных светосильных коллиматоров для восстановления волновых фронтов с голограмм сфокусированного изображения. Светодиодный коллиматор очевидно имеет существенные достоинства, в частности малые габариты, вес и легко транспортируется.

Над повышением излучательной эффективности светодиодных излучателей работают многие разработчики [1, 2]. Так в [1] изготовление светодиода включает создание гетероструктуры на основе нитрида галлия, на поверхность которой путем магнетронного распыления с отведением электронной бомбардировки наносят просветляющее покрытие из диоксида кремния с оптической толщиной, равной четверти длины световой волны. При этом на просветляющем покрытии формируют мкрельефную поверхность упорядоченной структуры в виде нанострий посредством электронно-лучевой литографии и последующего травления диоксида кремния. За счет этого достигают некоторого повышения квантовой эффективности светодиода.

В другой работе [2] при создании светодиода его формирователь с излучающим кристаллом и светопроницаемым отражателем монтируют на одном держателе. Причем светопроницаемый отражатель выполнен в виде купола, в частности, в форме параболической поверхности и с углублением на передней поверхности. Дном этого углубления служит линза со сферической поверхностью, фокус которой совмещен с фокусом параболоида и кристаллом. Для повышения световой эффективности на боковую поверхность отражателя наносят зеркальное покрытие, а на торцевую световыводящую поверхность и поверхность линзы наносят отдельно просветляющее покрытие.

Следует отметить, что эти сложные технологические операции позволили авторам увеличить светоотдачу светодиода, однако, этому способу изготовления присущи и существенные недостатки. В частности, необходимо проводить точный расчет параметров оптической системы светодиода, вводить дополнительные операции по формированию прецизионных размеров параболоида и линзы, а так же наносить покрытия двух типов: на боковую поверхность отражателя и торцевую световыводящую поверхность светодиода.

Авторами работы [3] разработан способ повышения излучательной эффективности светодиода, основанный на нанесении просветляющего покрытия по всей поверхности его световыводящего элемента. При нанесении покрытия показатель преломления материала просветляющего покрытия n_{Π} по абсолютному значению выбирают в $\frac{n_{\Pi}}{n_{\Sigma}}$ раз меньше показателя преломления материала световыводящего элемента n_{Σ} , и путем вариации n_{Π} и n_{Σ} отношение $\frac{n_{\Pi}}{n_{\Sigma}}$ задают в интервале от 0,65 до 0,95. Выбор отношения $\frac{n_{\Pi}}{n_{\Sigma}}$ в указанном интервале обеспечивает максимальное пропускание всей поверхности световыводящего элемента, соответствующее максимальной излучательной эффективности светодиода.

При нанесении покрытия на световыводящий элемент толщину h_{Π} просветляющего покрытия выбирают из условия ее максимального коэффициента пропускания всей поверхности световыводящего элемента, определяемую формулой:

$$h_{\Pi} = \frac{d_0}{n_{\Pi}},$$

где d_0 – оптическая толщина просветляющего покрытия, равная $n_{\Pi} l$, где l – геометрическая толщина слоя; n_{Π} – показатель преломления материала просветляющего покрытия. Следовательно, максимальному значению коэффициента пропускания поверхности световыводящего элемента будет соответствовать максимальный уровень световой эффективности светодиода.

Если световыводящий элемент по условиям производства должен быть иметь максимальную световую эффективность при отношении $\frac{n_{\Pi 1}}{n_{\Sigma 1}} = 0,65$, то для этого в качестве материала покрытия необходимо выбрать материал с $n_{\Pi 1} = 1,38$ например, фтористый магний, а в качестве материала $n_{\Sigma 1} = 2,1$ будет соответствовать оптический материал фианит. Если же это соотношение будет меньше величины 0,65, то мы не достигнем максимального коэффициента пропускания поверхности световыводящего элемента, и следовательно, максимальной излучательной способности светодиода, что подтверждается экспериментально. Поэтому величина отношения равная 0,65, служит критерием получения максимальной излучательной способности нового светодиода при данных $n_{\Pi 1}$ и $n_{\Sigma 1}$. С другой стороны, максимальное значение коэффициента пропускания поверхности световыводящего элемента можно получить и при другом значении отношения $\frac{n_{\Pi 2}}{n_{\Sigma 2}}$, равном 0,95, но в этом варианте необходимо использовать материалы просветляющего покрытия и световыводящего элемента, имеющих значения $n_{\Pi 2}$ и $n_{\Sigma 2}$, соответственно. Следовательно, путем выбора величины отношения $\frac{n_{\Pi}}{n_{\Sigma}}$ можно предсказывать как материал покрытий, так и материал световыводящего элемента нового светодиода. По мнению авторов, выбор указанного интервала отношений $\frac{n_{\Pi}}{n_{\Sigma}}$ делает предлагаемый способ универсальным технологическим средством при создании новых типов светодиодов.

Для экспериментальной апробации методики использовался светодиод, у которого по всей поверхности световыводящего элемента нанесено химическим способом однослойное однородное просветляющее покрытие. В качестве просветляющего покрытия использовали фторид магния, показатель преломления которого $n_{\Pi} = 1,38$. Световыводящий элемент светодиода выполнен из оптического материала марки фианит, у которого $n_{\Sigma} = 2,1$. При этих значениях n_{Π} и n_{Σ} измеренный максимальный коэффициент пропускания световыводящего элемента составил 0,99. Измеренная при этом сила излучения светодиода составила 102 мВт/ср. Для сравнения выбран светодиод тип АЛ-107 с $n_{\Sigma} = 1,5$, у которого коэффициент пропускания световыводящего элемента без просветляющего покрытия составил 0,92, а измеренная величина силы излучения составила 17 мВт/ср.

При создании светодиодного коллиматора излучаемый световой поток от светодиода собирают с помощью объектива коллиматора в пределах апертурного угла. Очевидно, что часть светового потока при этом все же теряется. Поэтому возникает практическая необходимость в разработке и создании светодиода, способного фокусировать излучаемый световой поток в точечный источник [4]. Это достигается путем соответствующего выбора оптической части светодиодного излучателя. Светоизлучающую оптическую часть выполняют, например, в виде конденсорной системы, являющейся аналогом конденсора, состоящего из двух плоско-выпук-

лых линз. Излучательную эффективность этого светодиода дополнительно увеличивают за счет нанесения просветляющего покрытия на его светоизлучающую поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилина Т.И. и др. Способ изготовления светодиода. Патент №2504867 от 20.07.2013. Бюл. № 2, 2013 г.
2. Богачев и др. Светодиод. Патент №1819488 от 20.05 1995 г.
3. Борисов А.Н., Черных В.Т. Светодиод. Заявка №2014144853 от 06.11.14. Реш о выд. Патента от 27.03.2015 г.
4. Черных В.Т., Черных Г.С., Борисов А.Н. Светодиод. Патент на полезн. мод. №152499 от 09.10.2014. Бюл. № 16, 2015 г.

LEDS - MINIATURE LIGHT SOURCES TO RESTORE THE WAVEFRONTS FROM HOLOGRAMS

Chernykh V.T., Borisov A.N.

(Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan)

The report presents the results of new research on the creation of miniature LED light sources that can be used to reconstruct wavefronts from holograms focused image. LED light sources are developed in two versions. In the first embodiment, the LED light sources, as compared to known, characterizes the maximum radiative efficiency and this parameter exceed the known LED almost an order of magnitude of the measurand. The effect of increasing the emissivity of the LED is achieved by selecting the optimal method of illumination surface emissivity of the optical system of the LED. Experiments carried out with the known LED showed that applying a single layer coating on the entire surface of the LED emitting svetovyvodyaschuyu possible to increase the efficiency emissivity 6 times compared with the LED on the radiating surface of which an antireflection coating is absent.

In the second variant – designed LED emitter having the property of focusing the light flux emanating from his svetovyvodyaschey surface. The latter is achieved through the special design of its svetovyvodyaschego element. In particular, the optical system svetovyvodyaschaya LED can be designed as a condenser system consisting of two objects. If the front focal plane of the condenser positioned radiative semiconductor crystal, then the output of the condenser outgoing light beam is focused into the back focal point. Using this LED emitter has created a collimator based on a single light source and the collimator lens, has been used successfully to restore the wavefronts from holograms.

LED emitters with focusing properties may also find application for spotlighting mikroskoobektov.

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Черных В.Т., Нуруллин Р.Г.

(Казанский государственный энергетический университет, (КГЭУ), г.Казань)

В настоящее время фототерапия находит эффективное применение для лечения остро возникающих дерматозов и других кожных заболеваний, сопровождающихся воспалительными процессами с микробной флорой.

Известные лазерные терапевтические устройства (ЛТУ) не являются гибкими по параметрам воздействия и в них ограничены возможности выбора оптимальных параметров воздействующих факторов.

В докладе рассмотрены разработки с расширенными возможностями регулирования параметров воздействующих факторов и упрощенные конструкции терапевтических устройств.

Предлагаемые авторами ЛТУ предназначены для воздействия на поверхность кожи высокоинтенсивным, дискретным по времени когерентным лазерным излучением, формируемым дистанционно подверженным фокусировке лучом лазера. Длину волны лазерного излучения выбирают в пределах от 300 нм до 1020 нм. Дискретное лазерное излучение формируют в широком диапазоне амплитуд интенсивности, для чего применяют расфокусированный или сфокусированный луч в зависимости от необходимой плотности потока энергии воздействия. Расфокусированный луч применяют для терапии обширных повреждений кожи, а сфокусированный луч (лазерный пучок) используют преимущественно для облучения локальных участков пораженных кожных покровов.

Плотность потока мощности лазерного излучения назначают в пределах от $0,5 \cdot 10^{-6}$ Вт/см² до $2,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/см². В отдельных случаях интенсивность излучения формируют по зонам интенсивности I_0 , $I_{\pm 1}$ и $I_{\pm 2}$, составляющим некоторую долю общей интенсивности потока излучения I_n и определяемыми порядками дифракции: -2 ; -1 ; 0 ; $+1$ и $+2$. При этом выдерживают соотношения: $I_0 > I_{\pm 1} > I_{\pm 2}$. В частном случае соотношение указанных величин интенсивности принимают в виде пропорции $I_0 : I_{\pm 1} : I_{\pm 2} = 1,000 : 0,047 : 0,016$. Длительность импульса выбирают в диапазоне от 0,3 нс до 30 нс в зависимости от тяжести поражения кожных покровов.

ЛТУ имеет лазерный световод, соединенный с источником лазерного излучения (импульсный лазер) 1, оптическую систему для формирования расфокусированного или сфокусированного луча. Оптическая система в простейшем варианте состоит из отрицательной линзы 2 и объектива коллиматора 3. Отрицательная линза 2 расположена между источником лазерного излучения 1 и коллиматором 3 (рис. 1).

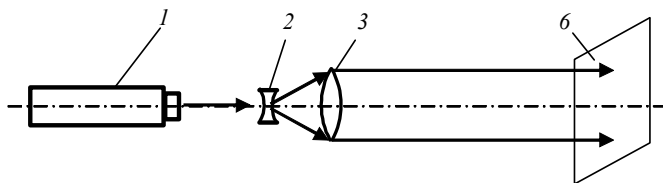


Рис. 1. Общая схема воздействия на поверхность кожи дистанционно подверженным фокусировке лучом лазера

Для получения расфокусированного луча оптическая система дополнительно включает в себя дифракционную решетку 4, расположенную на выходе коллиматора 3 (рис. 2).

Для получения сфокусированного луча после дифракционной решетки 4 установлен проекционный объектив 5. Плоскость облучения обозначена позицией 6. Плоскость облучения 6, как правило, зафиксирована относительно выходных элементов 4 и 5. Зоны облучения обозначены (-2 ; -1 ; 0 ; $+1$ и $+2$) для указания области облучения мишени, в качестве которой выступает пораженный болезнью участок кожи (рис. 3).

Лазерное излучение от лазера проходит через оптическую систему из элементов 2, 3, 4 и 5 и воздействует на область облучения. При этом интенсивность облучения регулируется за счет

фокусировки или расфокусировки луча и изменения взаиморасположения области облучения относительно зон интенсивностей по порядкам дифракции: -2 ; -1 ; 0 ; $+1$ и $+2$.

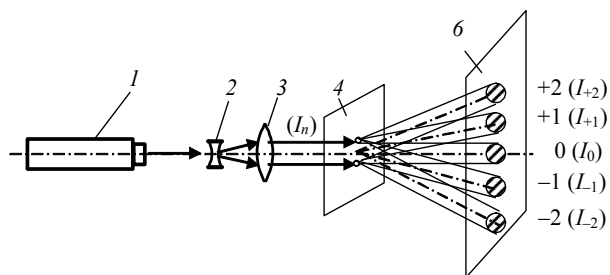


Рис. 2. Схема ЛТУ с дифракционной решеткой с указанием порядков дифракции

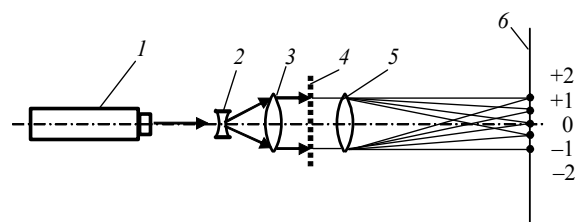


Рис. 3. Схема ЛТУ с проекционным объективом

Другой тип ЛТУ состоит из источника лазерного излучения в виде лазера 1 и волоконно-го световода 2 . Между лазером 1 и входным торцом световода 2 размещен первый объектив 3 . Расстояние от объектива 3 до входного торца световода 2 выбрано меньшим, чем длина его фокусного расстояния. За выходным торцом световода 2 установлен второй объектив 4 с возможностью согласования его апертуры с апертурой падающего на него светового пучка. Далее последовательно после второго объектива 4 размещен коллиматор из отрицательной линзы 5 и объектива 6 . В коллимированном пучке коллиматора установлен дифракционный элемент 7 , дифрагированные пучки излучения от которой направлены на плоскость 8 облучения тканей. Дифракционный элемент 7 выполнен с возможностью изменения угла расположения его плоскости относительно оптической оси. Кроме того, дифракционный элемент 7 имеет возможность вращения вокруг оптической оси выходной части терапевтического устройства (рис. 4).

На плоскости облучения 8 зоны интенсивности облучения в соответствии с порядками дифракции (0 ; $+1$; -1 ; $+2$; -2 и так далее). Зоны интенсивности облучения формируются соответственно траекториям следования лучей по мишени и соответствуют зонам интенсивности I_0 , $I_{\pm 1}$ и $I_{\pm 2}$, каждая из которых составляет некоторую долю общей интенсивности потока излучения I_n .

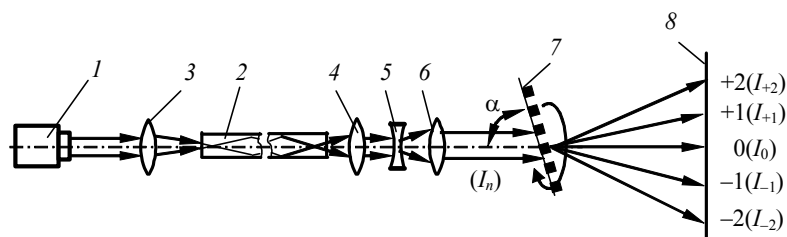


Рис. 4. Схема лазерного терапевтического устройства с одним лазером

При необходимости использования для терапевтических целей лазерного излучения с другими длинами волн предусмотрена установка дополнительных лазеров 9 , для чего в пространстве между лазером 1 и первым объективом 3 под углом к оптической оси установлена светоделительная пластина 10 для ввода излучения от лазеров 9 с другими длинами волн в оптическую систему (рис. 5).

Светоделительная пластина 10 выполнена с возможностью ввода ее в рабочее положение и вывода ее из рабочего положения в зависимости от необходимости выбора того или иного лазера. Светоделительная пластина 10 исполнена полупрозрачной, что позволяет проводить облучение одновременно несколькими лазерами.

Оптическое излучение от лазера 1 проходит через первый объектив 3 , направляется на торец световода 2 и проходит через волоконный световод 2 . Далее излучение проходит через

второй объектив 4, отрицательную линзу 5 и объектив 6, после чего подвергается дифракции на дифракционном элементе 7. Далее излучение воздействует на область облучения и осуществляет репарацию поврежденных тканей.

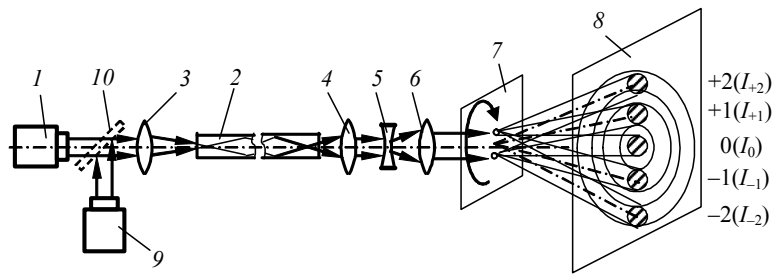


Рис. 5. Схема лазерного терапевтического устройства с двумя лазерами

При этом интенсивность облучения регулируется за счет изменения угла падения светового пучка на дифракционный элемент 7 и угловой скорости вращения дифракционного элемента 7 вокруг оптической оси. При этом формируются световые области воздействия пучков излучения в соответствии с порядками дифракции: 0; +1; -1; +2; -2 и так далее.

Предлагаемые ЛТУ позволяют стимулировать процессы репарации, улучшить кровообращение в тканях, ускорить эпителизацию, и тем самым обеспечивают эффективное лечение дерматологических заболеваний, а также снижают риск развития осложнений и исключают рецидивы. Повышение эффективности лазерной терапии происходит за счет выбора и назначения наилучшего режима интенсивности лазерного излучения. Устройство обеспечивает стабильность параметров воздействующих факторов, что позволяет снизить риск развития осложнений и исключить рецидивы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных В.Т., Нуруллин Р.Г. Способ лечения кожных заболеваний и лазерное терапевтическое устройство / Патент на изобретение № 2525277 от 17.06.2014, Бюл. № 22, 2014.
2. Черных В.Т., Нуруллин Р.Г. Лазерное терапевтическое устройство / Патент на изобретение № 2528659 от 23.07.2014, Бюл. № 26, 2014.

LASER THERAPEUTIC DEVICE

Chernykh V.T., Nurullin R.G.

(Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan)

Designed diffractive laser optic system with a variable power level of the irradiation of relapse in two versions. In the first embodiment of the proposed laser therapeutic device comprising a source of laser radiation, the laser fiber coupled to the laser source and the optical system for beam-forming. An optical system for shaping the beam consists of a negative lens and a collimator lens, and the irradiation plane is fixed relative to the output elements. In a second embodiment of the proposed laser therapeutic device comprising a source of laser radiation, the laser fiber coupled to the laser source and the optical system for forming a beam having a rotating element, and between the laser source and the input end of the optical fiber mounted in series optically connected to the first lens, the distance from the input end of the optical fiber is less than its focal length, the optical waveguide and the second lens, mounted at the exit end of the optical fiber with the ability to approve the aperture of the second lens with the aperture, emerging from the optical fiber, the collimator comprising a negative lens element and the lens. The collimated beam is mounted diffraction element, diffracted beams which serve as sources of irradiation of the affected tissues.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Борисов А.Н.,¹ Черных В.Т.,¹ Арбузов В.А.²

(¹ Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), г. Казань;

(² Институт Теплофизики СО РАН, г. Новосибирск)

Известны [1-3] интерференционные фильтры, имеющие высокий коэффициент пропускания в рабочей области спектра и малые величины фоновых коэффициентов пропускания в областях блокировки. Такие фильтры нашли применение в качестве солнечно-слепых фильтров, предназначенных для оптико-электронной аппаратуры, работающей в ультрафиолетовой области спектра.

В работах [1, 2] разработаны и исследованы интерференционные фильтры для ультрафиолетовой области спектра, состоящие из плоских кварцевых подложек с нанесенными на обе стороны интерференционными слоями и склеенными между собой прозрачным клеем.

В работе [3] приведена конструкция интерференционного фильтра, выполненного из плоских кварцевых подложек с нанесенными на обе стороны каждой из них интерференционными слоями и склеенными между собой.

Недостатком известных интерференционных фильтров является ограниченные технологические возможности преобразования падающего на них широкого спектра излучения в заданные линии излучения. На практике представляет интерес разработка интерференционного фильтра, который позволял бы одновременно выделять совокупность длин волн при падении на фильтр широкого спектра излучения.

В докладе приведены результаты по созданию технологической возможности изготовления фильтра с широким диапазоном селекции на его выходе различных длин волн [4].

Показано, что путем оптического соединения между собой набора из N цилиндрических оптических элементов, образующих многокомпонентный интерференционный фильтр, причем на боковую поверхность каждого оптического элемента наносят интерференционное покрытие, а на входной торец многокомпонентного интерференционного фильтра наносят двумерный растр, посредством которого формируют набор дифрагированных пучков, падающих под разными углами на входной торец фильтра. Торце фильтра представляет собой набор элементарных площадок многокомпонентного интерференционного фильтра, при этом каждый из элементарных дифрагированных пучков при прохождении оптического элемента многокомпонентного интерференционного фильтра претерпевает многократные отражения внутри каждого оптического элемента с интерференционным покрытием, производя на выходном торце многокомпонентного интерференционного фильтра селекцию электромагнитных волн различной длины.

Сущность конструкции поясняется чертежами, на которых представлен собственно многокомпонентный интерференционный фильтр (рис. 1), вид многокомпонентного интерференционного фильтра со стороны входного торца с двумерным растром на его поверхности (рис. 2), и вид изображения селективируемых световых пучков разных длин волн в фокальной плоскости проекционного объектива (рис. 3).

Принцип действия предлагаемого интерференционного фильтра, состоит в следующем.

Излучение I от источника света поступает на входной торец 3 фильтра (рис. 1). Фильтр состоит из набора (N) цилиндрических оптических элементов 6 (рис. 2), соединенных друг с другом с помощью оптического контакта, клея или другим оптическим способом, образуя многокомпонентный интерференционный фильтр 5.

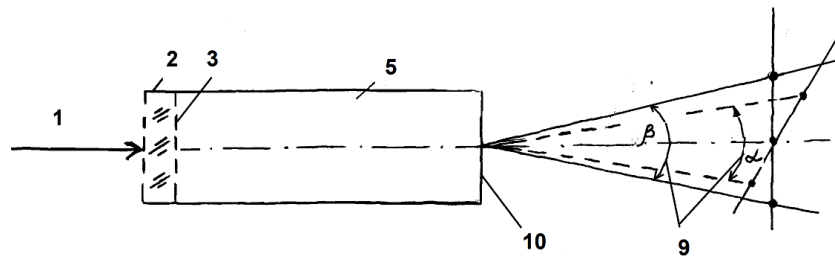


Рис. 1. Многокомпонентный интерференционный фильтр:
1 – падающее излучение; 2 – двухмерный растр; 3 – входной торец фильтра; 9 – углы дифракций элементарных пучков; 10 – выходной торец фильтра

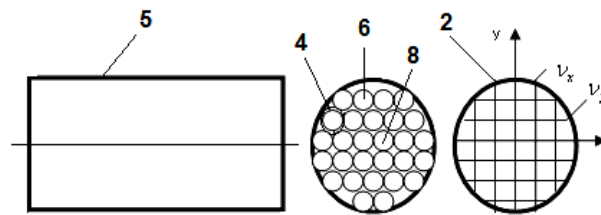


Рис. 2. Вид многокомпонентного интерференционного фильтра со стороны входного торца с двумерным растром на его поверхности: 4 – интерференционное покрытие; 5 – многокомпонентный интерференционный фильтр; 6 – набор цилиндрических оптических элементов; 8 – набор элементарных торцевых площадок

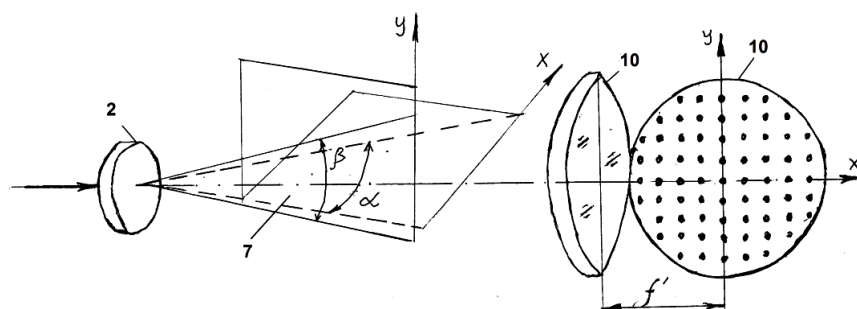


Рис. 3. Вид изображения селективируемых световых пучков разных длин волн в фокальной плоскости проекционного объектива: 2 – двумерный растр; 7 – набор дифрагированных пучков; 10 – выходной торец фильтра

На внешнюю поверхность каждого из N цилиндрических оптических элементов 6 нанесено зеркальное высокоотражающее покрытие 4 (интерференционное или металлическое).

На входной торец 3 фильтра нанесен или совмещен с поверхностью торца двухмерный растр 2 (рис. 1). Растр характеризуется двумя пространственными частотами ν_x и ν_y полос или штрихов, определяемых углами дифракции пучков α и β (9) (рис. 1).

Дифрагированные пучки 7 под разными углами падения поступают на элементарные торцевые площадки 8 (рис. 2) многокомпонентного интерференционного фильтра. Каждый из элементарных дифрагированных пучков при прохождении оптического элемента претерпевает многократные отражения внутри каждого элементарного оптического элемента с нанесенным на его внешнюю поверхность интерференционным покрытием. За счет этого происходит селекция (выделение) совокупности различных длин волн 3 на выходном торце 10.

Таким образом, создан принципиально новый способ изготовления многокомпонентного интерференционного фильтра, позволяющего расширить технологические возможности

селекции различных длин волн в излучении, поступающем на входной торец многокомпонентного интерференционного фильтра. Фильтр относится к оптическому приборостроению и может быть использован в качестве эффективного преобразующего оптического элемента в спектральных и колориметрических приборах, в лидарах, в мультиплексорах волоконно-оптических устройств, а также как собственно оптического интерференционного селектирующего элемента для демонстрационных учебных и научных применений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов А.Н.* Ультрафиолетовый фильтр с глубоким подавлением фона. / Гайнутдинов И.С, Несмелов Е.А. Никитин А.С. Иванов В.А. – Оптический журнал, 2000. Т. 67. № 10. С. 67- 69.
2. *Астрашевский Ю.И., Людчик А.М., Стельмах Г.Ф., Турышев Л.Н., Юркевич И.И.* Интерференционные фильтры для фотометрической аппаратуры УФ диапазона спектра. Журнал Прикладной спектроскопии. Т. 79. № 5. 2012.
3. *Борисов А.Н., Маркин Ю.С.* Интерференционный фильтр Патент на полезную модель РФ 2012 RU № 117185 U1G01 N 21/00.
4. *Борисов А.Н., Черных В.Т.* Фильтр интерференционный. Патент на полезную модель РФ №152646 от 10.06.15. Бюл. № 16, 2015 г.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN INTERFERENCE FILTER FOR COHERENT OPTICAL SYSTEMS

Borisov A.N.,¹ Chernykh V.T.,¹ Arbuzov V.A.²

(¹ Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan;

² Institute of Thermal Physics SB RAS, Novosibirsk)

The paper presents the results of the new design of the interference filter, which is optically coupled between a set of cylindrical optical elements forming multicomponent interference filter. On a side surface of each optical element is applied interference coating, and the entrance end of the multicomponent interference filter deposited dimensional raster, which is formed by a set of diffracted beams incident at different angles on the input end of the filter. Each of the elementary beams diffracted by passing the optical element multicomponent interference filter undergoes multiple reflections inside of each optical member with an interference coating producing a multi-component at the output end of the electromagnetic interference filter selection of different wavelengths.

Filters can be used as an efficient conversion of the optical element and in the spectral colorimetric devices, lidars in the multiplexer fiber optic devices, as well as the actual optical interference selecting element for demonstration educational and scientific applications.

ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК В ПРОЦЕССЕ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Борисов А.Н., Черных В.Т.

(Казанский государственный энергетический университет, (КГЭУ), г. Казань)

В области тонкопленочных покрытий одной из важнейших задач играет точность измерения толщины наносимого слоя в процессе его формирования. Современные достижения в области лазерных источников излучения и голографических методов послужили основанием для разработки двухлучевого голографического устройства применительно к решению поставленной задачи. Причем, в разработанном устройстве реализованы различные голографические методы: метод голографической двухэкспозиционной интерферометрии, метод голографической интерферометрии реального времени, метод отдельных голограмм и другие, детально рассмотренные в работе [1].

Для контроля толщины формируемого слоя в процессе нанесения разработано голографическое устройство, принципиальная схема которого изображена на рис. 1.

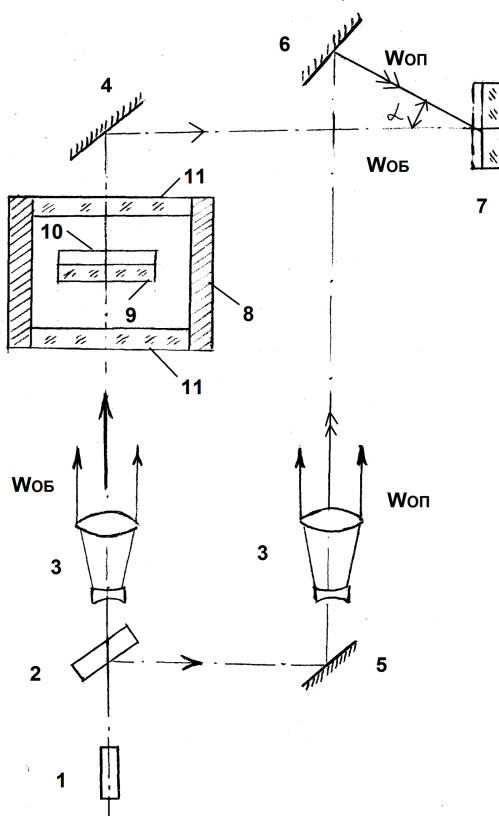


Рис. 1. Принципиальная схема голографического устройства:

1 – лазер *He-Ne* ($\lambda = 632,8$ нм, $P_{\text{изл}} = 50$ мВт), 2 – светоделитель; 3 – коллиматоры; 4 – 6 – зеркала; 7 – регистрирующая среда; 8 – вакуумная камера; 9 – подложка; 10 – напыленный слой; 11 – защитные окна

Принцип действия устройства состоит в следующем. Когерентное излучение от лазера непрерывного или импульсного действия 1 с помощью светоделителя 2 делится на объектный $W_{\text{об}}$ и опорный $W_{\text{оп}}$ пучки. Далее эти пучки поступают в коллиматоры 3. Объектный пучок $W_{\text{об}}$ проходит через рабочую камеру 11 вакуумной установки 8 и с помощью зеркала 4 направляется на регистрирующую среду 7. С помощью элементов 5, 3 и 6, образующих опорную ветвь, в

плоскость этой среды также поступает опорный пучок $W_{\text{об}}$, образуя некоторый угол α с объектным пучком. Перед первой экспозицией в рабочую камеру δ устанавливают прозрачную подложку ϑ и при рабочем давлении в камере, производят первую экспозицию. Далее с помощью испарителя на поверхности подложки формируют слой покрытия некоторой оптической толщины d и выполняют вторую экспозицию.

При записи голограммы, устройство настраивают так, чтобы полосы на интерферограмме были перпендикулярны плоскости подложки ϑ . Достигают это путем изменения угла α между пучками $W_{\text{об}}$ и $W_{\text{оп}}$ на величину $\Delta\alpha$ за время между экспозициями посредством зеркала δ .

Голографическую интерферограмму получают при восстановлении волновых фронтов с голограммы в этом же устройстве или отдельно от него. По деформации полос в области напыляемого слоя можно оценить его толщину. Методика оценки толщины слоя на основе интерференционной картины находится в стадии разработки.

При реализации в устройстве метода голографической интерферометрии реального времени, появляется возможность в процессе формирования слоя оценивать его толщину и одновременно заканчивать процесс нанесения.

На основе выполненной разработки создается макет голографического устройства для реализации его в вакуумно-технологической установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекетова А.Н., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. – Л., изд. «Наука». – 1979. 232 с.

HOLOGRAPHIC DEVICE FOR MONITORING THE THICKNESS OF THE FILMS DURING THEIR FORMATION

Borisov A.N., Chernykh V.T.

(Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan)

Developed a two-beam holographic apparatus for measuring the thickness of the layer during its formation. Optical system is focused on the use of it in a real vacuum system, by means of which the production of coatings, as well as other coating methods such as chemicals. Development of devices based on the latest achievements in the field of holographic methods and laser technology.

РАЗРАБОТКА ФАЗОУПРАВЛЯЕМЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Борисов А.Н., Никитин А.С.

(Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), г. Казань)

Оптическая схема прецизионных оптико-электронных приборов подразумевает использование по крайней мере одного фазоуправляемого элемента, предназначенного для коррекции нестабильности суммарной фазовой анизотропии всего устройства.

Чувствительным элементом лазерного гироскопа является лазер с кольцевым резонатором, в котором генерируются две независимые противоположно направленные моды излучения. Частоты встречных мод определяются скоростью вращения кольцевого резонатора в инерциальном пространстве. Разность частот встречных мод пропорциональна угловой скорости вращения Ω . При малых угловых скоростях существует зона нечувствительности и смещения нуля, а также нестабильность характеристик во времени от включения к включению и при изменении внешних условий. Причиной появления зоны нечувствительности и нелинейной характеристики при малых угловых скоростях является связь встречных мод, возникающая из-за обратного рассеяния света на элементах резонатора. Эта связь приводит к синхронизации мод (явление захвата) в некотором интервале угловых скоростей.

Для сведения к минимуму этого явления рабочую точку лазерного гироскопа смещают за счет искусственно создаваемой разности хода встречных мод. Наличие разности фазовых сдвигов для S и P-поляризаций при отражении от зеркал резонатора также приводит к дополнительной разности частот, что вносит искажения в работу прибора.

Интерференционные зеркала, имеющие высокий коэффициент отражения состоят из большого числа чередующихся слоев с высоким и низким показателями преломления, и имеют различия фазовой анизотропии, поскольку из-за наличия погрешностей технологического процесса производства невозможно изготовить абсолютно идентичные зеркала. С целью компенсации сигналов при проходе излучения по контуру прибора, в состав кольцевого лазера вводят оптический элемент, позволяющий обратимо изменять величину фазовой анизотропии в пределах одного градуса.

Результаты исследования и создания таких элементов можно найти в работах [1-3]. В [1] предложено в качестве фазоуправляемого элемента использовать интерференционное зеркало, внешний слой которого выполнен из халькогенидного материала. Управление фазовой анизотропией такого зеркала осуществляется путем воздействия на него лазерным излучением, которое изменяет оптические свойства халькогенидного материала, приводя к необратимому изменению анизотропии оптического элемента.

В работе [2] для управления фазовой анизотропией применен элемент состоящий из призмы с нанесенной на её рабочую поверхность системой слоев и магнито - оптического устройства, установленных с микрозазором между отражающими поверхностями. Все управление элементом осуществляется с помощью пьезопривода и позволяет изменять анизотропию в широких пределах. У подобного элемента достаточно сложное устройство и применение его в качестве узла кольцевого генератора весьма проблематично из-за сложности установки в моноблок на оптический контакт.

В работе [3] предложено в качестве фазоуправляемого устройства использовать интерференционное зеркало, нанесенное на электропроводящий слой. При подаче на контакты разности потенциалов за счет внутреннего сопротивления слой нагревается, вызывает прогрев всех слоев, расположенных над ним. Под воздействием температуры происходят изменения

оптических толщин слоев, что и приводит к изменению величины фазовой анизотропии. Это изменение пропорционально изменению мощности нагревателя и, что очень важно, носит обратимый характер.

В последние годы внимание исследователей стали привлекать магнитооптические свойства пленок [4-5], так как пленки с подобными свойствами удобно использовать в управляемых оптических системах.

Известно большое количество физических эффектов, которые могут использоваться для управления световыми пучками, однако последние годы в устройствах модуляции почти безраздельно господствуют три явления:

линейный электрооптический эффект Поккельса; магнитооптический эффект Фарадея; упругооптический эффект.

Менее широко применяется квадратичный электрооптический эффект Керра, наблюдаемый в кристаллах с центром симметрии и жидкостях.

Линейным электрооптическим эффектом называется изменение показателя преломления вещества, пропорциональное приложенному электрическому полю. Широкое применение линейного электрооптического эффекта (ЭО) связано, прежде всего, с наличием целого ряда кристаллов, обладающих значительным электрооптическим эффектом [4]. Изменение показателя преломления среды при ЭО эффекте достигается не за счет нелинейной поляризуемости среды, возникающей под действием электрического поля световой волны, а за счет нелинейной поляризуемости этой среды, возникающей под действием внешнего электрического поля. При ЭО эффекте значение показателей преломления собственных волн и направление их векторов поляризации определяются не только внутренними свойствами симметрии среды и состоянием поляризации падающей световой волны, но также направлением и симметрией внешнего параметра, т.е. электрического поля [5]. Всё это существенно усложняет процесс описания ЭО эффекта даже на феноменологическом уровне, особенно в кристаллических средах. Для многих приложений феноменологическое описание ЭО эффекта всё же оказывается достаточным, несмотря на то, что оно не позволяет получить информацию об абсолютной величине эффекта и количественных соотношениях между ЭО коэффициентами. Это связано с тем, что ЭО коэффициенты для большинства материалов табулированы и составляют основу для разнообразных применений [6].

Основываясь на эффекте нелинейной поляризуемости среды, возникающей под действием электрического поля световой волны, разработано фазоуправляемое устройство, способное мгновенно и обратимо изменять фазовую анизотропию оптического элемента.

В отличие от отмеченных выше известных устройств, в данной работе слой магнитооптического материала, способного изменять свои свойства под действием внешнего магнитного поля, использован в качестве резонансного слоя при формировании узкополосного фильтра. Размещение магнитооптического материала именно в резонансном слое позволяет значительно увеличить эффект управления, поскольку резонансная система является наиболее чувствительной из всех типов покрытий.

Таким образом, структура оптического элемента представляет собой интерференционный фильтр, состоящий из двух интерференционных зеркал, разделенных между собой слоем магнитоактивного вещества, толщина которого выбрана из условия согласования фазовой анизотропии суммарного фильтра. При воздействии внешнего поля, оптические свойства резонансного слоя изменяются, что приводит к мгновенному изменению изотропии системы. Кроме того, пленочная система может быть рассчитана таким образом, чтобы фазовая анизотропия центрального слоя заведомо имела отклонения от нормы, и при воздействии внешнего поля позволяла выравнять анизотропию всей тонкопленочной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заявка 4510888 от 21 марта 1989 G 02B 5/28. Борисов А.Н., Антонюк В.Н., Панасенко Б.В., Полякова В.Н. Способ изготовления многослойного интерференционного зеркала.
2. А.С. N 1509792 СССР, МКИ G02B 5/28,5/04. Фазоизотропный уголкового отражатель./ Борисов А.Н., Антонюк В.Н., и др. Заявл. 30.09.87. Оpubл. 15.07.88, Бюл. № 35 //Открытия, изобретения. С. 183.
3. Борисов А.Н., Никитин А.С., Иванов В.А., Гайнутдинов И.С. Неполярирующие высокоотражающие зеркала и зеркала с управляемой фазовой анизотропией для прецизионных лазерных систем. // Оптический журнал. – 1993. – № 9. – С. 65-69.
4. Курилкина С.Н., Шуба М.В. Распространение и преобразование световых волн в магнитоактивных периодических структурах. // Оптика и спектроскопия, 2002. Т. 93. № 6. С. 990-994.
5. Курилкина С.Н., Шуба М.В. Усиление эффекта Фарадея в магнитоактивных периодических структурах с дефектом. // Оптика и спектроскопия, 2002. Т. 93. № 6. С. 993-999.
6. Курилкина С.Н., Шуба М.В. Особенности распространения света в периодических структурах с естественной и электроиндуцированной анизотропией. // Оптика и спектроскопия, 2002. Т. 93. № 6. С. 985-989.

DEVELOPMENT PHASE-CONTROL INTERFERENCE THIN FILM ELEMENTS FOR COHERENT OPTICAL SYSTEMS

Borisov A.N., Nikitin A.S.

(Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan)

The report presents the results of a new development fazoupravlyaemogo interference thin film element to coherent optical systems, which is an interference filter consisting of two interference mirrors separated by a layer of magnetically active material, the thickness of which is selected from the anisotropy of the phase matching conditions of the filter. When exposed to an external field, the optical properties of the resonant layer varies, resulting in an instantaneous change in the isotropy of the system. In addition, the film system can be designed so that the anisotropy of the phase center layer had obviously abnormal, and when exposed to an external field aligns anisotropy entire thin film structure.

Fazoupravlyayuschee device can be used as efficient optical elements for precision instruments.

РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РОЗЖИГА ТОПОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ТОПКИ КОТЛА

Черных В.Т., Черных Д.А.

(¹ Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ);

*² (Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

В области энергомашиностроения большое внимание обращается на разработку запально-но – защитных устройств для автоматического розжига запальной растопочной горелки топки котлов тепловых электростанций, работающих на газообразном топливе. В работе рассмотрено лазерное устройство, которое может использоваться для этой цели, и может быть включено в общую систему автоматического управления работой котлов, а также может применяться как самостоятельное бесконтактное устройство для розжига запальной горелки топки котла.

В работе [1] для этих целей используются электронная система розжига запальной горелки топки котла, которая включает высоковольтный блок, искрообразователь и элемент пуска искрообразователя. Эта сложная система требует регулировки и настройки разрядного канала, так как при высоком напряжении наблюдается обгорание электродов и увеличение длины канала разряда. Последнее может нарушать регулярное искрообразование и приводит к сбоям розжига запальной горелки топки котла.

В другой работе [2] описано устройство, предназначенное для воспламенения топливной смеси в двигателе внутреннего сгорания. Оно содержит лазерный источник излучения, поток от которого посредством световода и одиночной фокусирующей линзы направляется в локальную область топливной смеси для ее воспламенения. Очевидно, что оптическую систему этого устройства не представляется возможным непосредственно применить для искрообразования в области запальной горелки топки котла, имеющей большие габаритные размеры. Поэтому разработка оптической системы лазерного устройства проводилась с учетом размеров топки котла. Оптическая система разработана на основе сферических зеркал и обладает большей светосилой по сравнению с системой на основе обычных элементов.

Оптическая система лазерного устройства изображена на рис. 1.

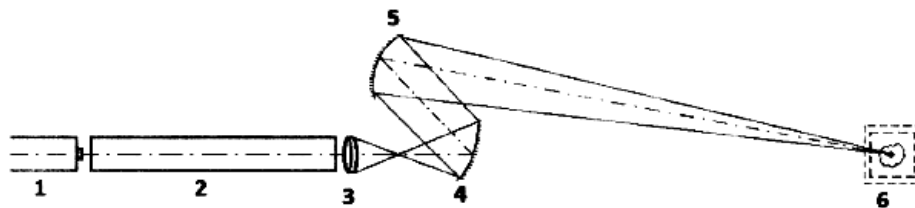


Рис. 1

Здесь: 1 – лазерный источник; 2 – световод; 3 – фокусирующий объектив; 4, 5 – сферические зеркала и 6 – топка котла. Лазерный источник излучения 1 излучает в инфракрасной области спектра, причем мощность лазерного излучения в фокальной точке зоны 6 запальной горелки топки котла обеспечивает температуру, равную температуре воспламенения топлива топки котла. Оптическая система включает систему сферических зеркал 4 и 5. Апертура зеркала 4 согласована с апертурой пучка, сформированного объективом 3. Сферические зеркала установлены вдоль оптической оси системы. Сферическое зеркало 5 является фокусирующим зер-

калом, формирует фокальную точку в зоне розжига запальной горелки топки котла и имеет фокусное расстояние, определяемое по формуле: $f = \frac{L}{2}$, где L – расстояние от зеркала 5 до плоскости розжига запальной горелки топки котла. Оптические элементы лазерного устройства изготавливают из материала, прозрачного в ИК области спектра. В качестве таких материалов служат германий, фтористый литий и другие материалы.

Для уменьшения потерь потока излучения на объектив 3 и торцы световода 2 наносят просветляющее покрытие, например, сульфид цинка. На поверхности сферических зеркал 4 и 5 наносят отражающее интерференционное покрытие, например, сульфид цинка, фторид иттрия, позволяющее достичь коэффициента отражения поверхностей зеркал, равного 0,99.

В зависимости от мощности излучения лазера в качестве элемента 3 могут использоваться двояковыпуклая или двояковогнутая линзы. В лазерном интерферометре в качестве источника излучения можно использовать лазер на CO_2 с длиной волны излучения, равной 10,6 мкм. При этом мощность излучения лазерного источника I выбирается такой, чтобы в фокальной точке зоны б розжига запальной горелки обеспечить температуру, равную температуре воспламенения (возгорания) газообразного топлива топки котла.

Следует отметить, что в лазерном устройстве для розжига запальной горелки топки котла может быть реализована обратная связь в электронном канале наблюдения и слежения за наличием факела, и, в случае погашения факела, на блок питания лазера I должен поступить импульс запуска лазера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газовое оборудование, приборы и арматура: спр. пособие под ред. Н.И. Рябцева, – М., Недра, 1985. С. 494-496.
2. Дрегалин А.Ф., Мухамедзянов Р.А., Самтаров А.Г. и др. Патент №2436991 от 20.12.2011 г. Бюл. № 35, 2011 г.

DEVELOPMENT OF LASER DEVICES FOR IGNITION COMBUSTION BURNER FURNACE BOILER

Chernykh V.T., Black D.A.

(¹ Kazan State Power Engineering University (KSPEU);

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU-KAI), Kazan)

The report presents the results of the development of the optical system of the laser device for ignition pilot burner combustion chamber. The device can be used in the development of Buse - protective devices for the automatic ignition of the spark ignition burner furnace boilers of thermal power plants running on gaseous fuels. It can be incorporated into the general system of automatic control of boilers, as well as used as a standalone device for contactless ignition spark ignition burner combustion chamber. The optical system of the device includes a laser light source, working in the infrared (IR) region of the spectrum, and a system of spherical mirrors that focus the flow of infrared radiation in the local region of the spark ignition burner of the boiler. The optical elements are made of IR materials on the surface of which is coated with a reflective coating that allows you to get the reflection coefficient of the surface of the mirror is 0.99. The invention relates to a contactless means of ignition spark ignition burner boiler furnace.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ЗАДАЧАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДОВОДКИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Жужукин А.И.

(ОАО «Кузнецов», г. Самара)

В настоящее время экспериментальные исследования вибрационных характеристик деталей газотурбинных двигателей (ГТД) являются обязательным этапом в повышении надежности конструкций ГТД. К наиболее эффективным средствам исследования колебаний деталей и узлов ГТД относятся методы голографической и спекл-интерферометрии [1, 2].

В последнее десятилетие широкое развитие получили методы цифровой спекл-интерферометрии, которые менее требовательны к обеспечению стабильности оптической схемы и при этом не используются фотоматериалы [3]. В этом случае формирование спекл-интерферограмм и обработка экспериментальных данных производится в ЭВМ. С помощью этого метода можно бесконтактно и оперативно получать информацию о формах и частотах резонансных колебаний объекта по всей исследуемой поверхности.

На ОАО «КУЗНЕЦОВ» разработан цифровой спекл-интерферометр (ЦИ) с разделёнными пучками и гладкой опорной волной, который используется для вибрационного контроля деталей ГТД в лабораторных условиях (рис. 1).

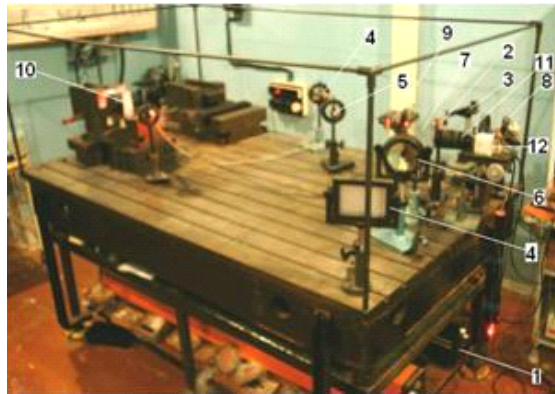


Рис. 1. Спекл-интерферометр с разделёнными пучками и гладкой опорной волной для исследования лопаток ГТД

С помощью данной установки были исследованы вибрационные характеристики лопатки направляющего аппарата 3-й ступени компрессора (рис. 2).

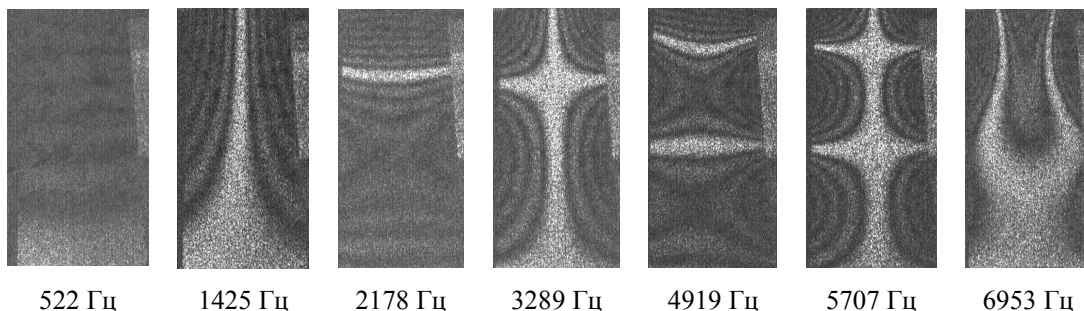


Рис. 2. Частоты и формы колебаний 3-й ступени компрессора

Вместе с тем на практике остро стоит проблема обеспечения вибрационной прочности рабочих колёс турбомашин. На ОАО «КУЗНЕЦОВ» разработан ЦСИ для исследования колебаний крупногабаритных деталей и узлов ГТД на базе непрерывного лазера (рис. 3). При этом использован интерферометр с разделёнными пучками и гладкой опорной волной.



Рис. 3. Установка для исследования колебаний крупногабаритных деталей и узлов ГТД

С помощью этой установки проведены исследования резонансных колебаний колеса 1-ой ступени турбины одного из авиационных двигателей (рис. 4).

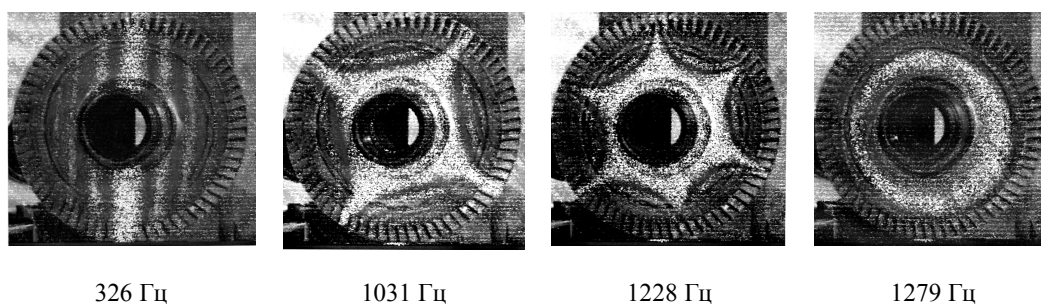


Рис. 4. Частоты и формы колебаний 1-й ступени турбины

Для определения вибрационных характеристик деталей и узлов ГТД во внестендовых условиях на ОАО «КУЗНЕЦОВ» создан мобильный спекл-интерферометр на основе оптической схемы с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной (рис. 5). Такой интерферометр позволяет проводить исследования собственных частот и форм колебаний деталей без использования интерферометрического стола.

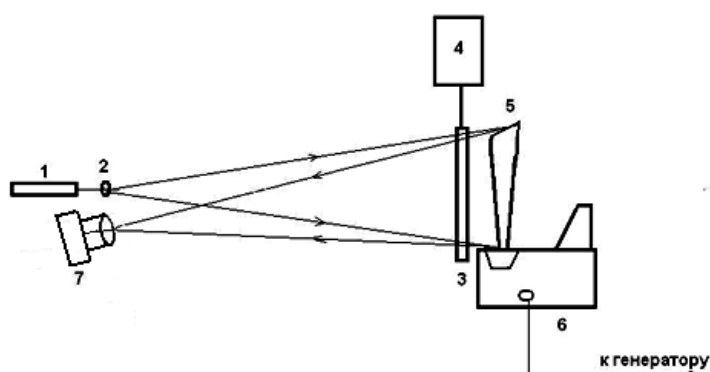


Рис. 5. Спекл – интерферометр с совмещёнными пучками и спекл – модулированной опорной волной для исследования вибрационных характеристик деталей ГТД

Применение данной установки для исследования вибрационных характеристик лопаток приведено в работе.

В ходе дальнейших экспериментов были проведены исследования колебаний фрагмента поверхности колеса компрессора во внестеновых условиях без использования интерферометрического стола (рис. 6).

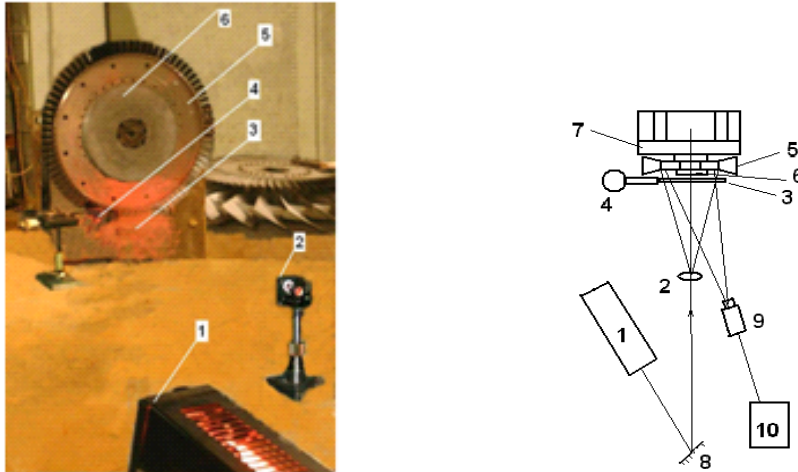


Рис. 6. Общий вид и схема спекл – интерферометра для исследования вибраций участка поверхности колеса компрессора

С помощью мобильного спекл-интерферометра исследовались вибрационные характеристики фрагмента поверхности колеса турбины, подвешенного на валу (рис. 7). Это позволяет наблюдать связанные колебания лопаток колеса турбины и проводить исследования в условиях более близких к условиям эксплуатации.

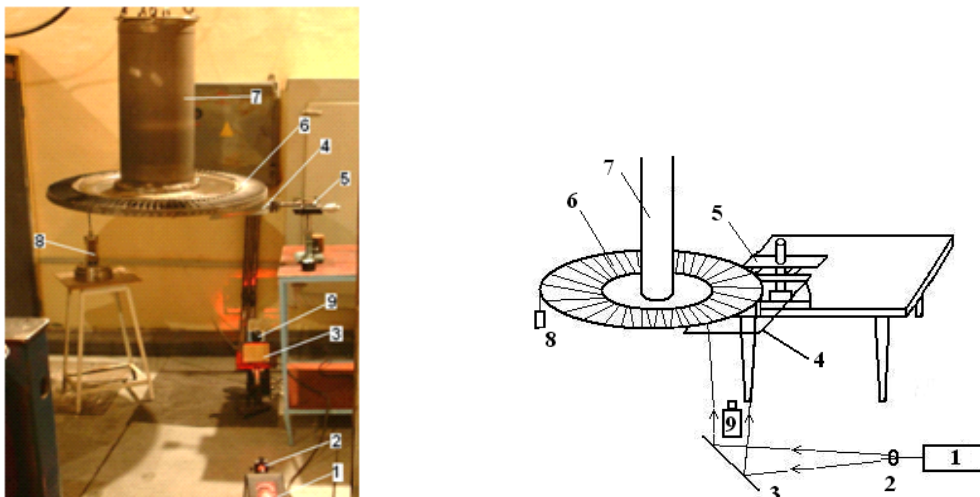


Рис. 7. Общий вид спекл – интерферометра для исследования колебаний фрагмента поверхности колеса турбины, подвешенного на валу

Результаты испытаний представлены на рис. 8.

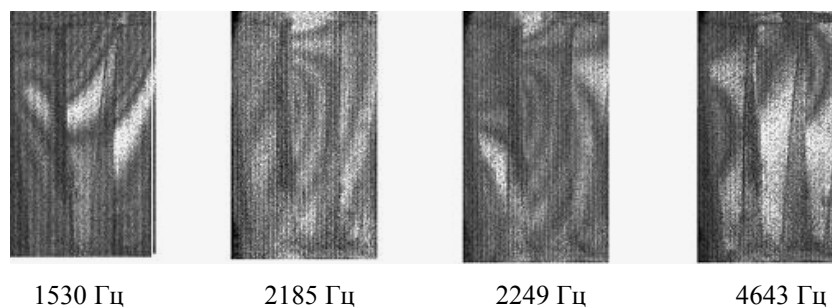


Рис. 8. Формы колебаний участка поверхности колеса турбины

Таким образом, спекл-интерферометры с разделёнными пучками и гладкой опорной волной позволяют проводить исследования колебаний деталей и узлов ГТД только в условиях специализированной лаборатории. Для проведения исследований во внестендовых условиях эффективно может быть использован мобильный ЦСИ на основе оптической схемы с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаева Р.Х. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии [Текст] / Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царёва. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 1. – С. 78 – 80.
2. Джоунс Р. Голографическая и спекл – интерферометрия [Текст] / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
3. Жужукин А.И. Мобильный спекл – интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестендовых условиях [Электронный ресурс] / А.И. Жужукин // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. – № 47.

THE APPLICATION OF SPECKLE INTERFEROMETRY IN TASKS OF EXPERIMENTAL OPERATIONAL DEVELOPMENT OF DETAILS OF GAS TURBINE ENGINES

Zhuzhukin A.I.

(«Kuznetsov», Samara)

On the basis of the interferometer with divided beams and a smooth reference wave was developed speckle-interferometric equipment for studying the vibration characteristics of parts and large-sized units of the gas turbine engine.

To study the vibrations of structures of the engine on the outside test-bench was developed speckle-interferometr with the combined beams and speckle-modulated reference wave. The examples of the use of both units during the operational development of the engine are presents.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ПОДВЕСА ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СЛЕДЯЩЕГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА В SOLIDWORKS

Бурдинов К.А., Смирнов А.Е., Карпов А.И.

(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Аннотация

Разработана конструкция двух осевого карданного подвеса, в котором размещен лазерный дальномер, камера видимого диапазона. Конструкция позволяет управлять осью визирования по двум углам в пределах полусферы.

Разработана конструкция макета конструкции оптико электронного прибора состоящего из лазерного дальномера и камеры видимого диапазона. Конструкция разрабатывалась с учетом результатов экспериментальных исследований малогабаритного аналога рассматриваемого оптико-электронного прибора (фокусное расстояние 35 мм, диаметр вх. зр. 10 мм, массой 100 гр. 66 x 66 x 80 мм). Прибор находится в жестком корпусе и помещен в двух осевой карданный подвес. На рис. 1 приведена кинематическая схема карданового подвеса.

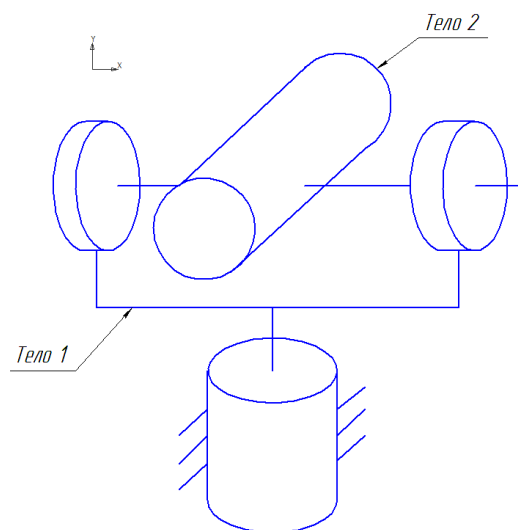


Рис. 1. Кинематическая схема прибора

Конструкция позволяет управлять осью визирования по двум углам в пределах полусферы с помощью двигателей. Двигатели расположены на внешней и внутренней рамке карданового подвеса и оси вращения перпендикулярны оптическим осям дальномера и камеры.

На рис. 2 приведена конструкция макета разработанного в SolidWorks.

На рис. 3 приведена конструкция внешней рамки с азимутальным ротором двигателя и тангажным статором двигателя. Для уменьшения веса и моментов инерции в конструкции рамки сделаны отверстия.

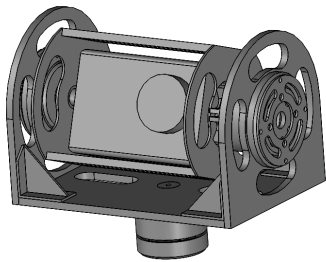


Рис. 2. Конструкция макета

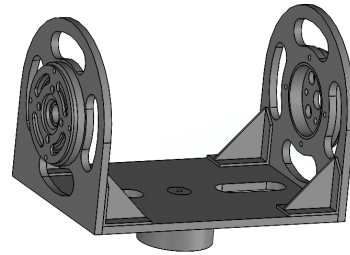


Рис. 3. Конструкция внешней рамки с приводом

На рис. 4 приведена конструкция внутренней рамки. В ней размещены ротор тангажного двигателя, подшипник и камера и дальномер. Для уменьшения веса и моментов инерции в конструкции рамки сделаны отверстия.

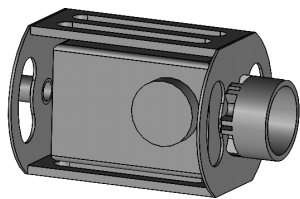


Рис 4. Конструкция внутренней рамки с приводом

На первом этапе макета предполагается использование бесколлекторных трехфазных двигателей с постоянными магнитами в конструкции ротора типа 22N8P. Соосно с осями роторов двигателей предполагается размещение датчиков углов типа ЦПУ-1-16 (НПП Геофизика-космос). Конструкция рассчитана под камеру GoPro Hero3 (фокусное расстояние 18 мм, размер матрицы 1280x720 px, частота кадров 120 кадров/секунду).

Для реализации алгоритмов управления камерой совместно с дальномером в конструкции предусмотрено размещение блока датчиков акселерометров и угловых осей (по трем осям). Силовые и сигнальные цепи (питание к двигателям и датчикам) к внутренней рамке подведены через прецизионные кольца со щетками.

Далее представлены конструкции внешней и внутренней рамки:

Конструкция внешней рамки с приводом:

Ротор азимутального двигателя (Красного цвета)

Рамка (Зеленого цвета)

Статор тангажного двигателя (Синего цвета)

Конструкция внутренней рамки с приводом:

Ротор тангажного двигателя (Синего цвета)

Рамка (Желтого цвета)

Подшипник

Камера

Выводы

Конструкция имеет следующие габаритно массовые характеристики:

Габариты – 102 x 104 x 110 мм

Масса около – 600 гр.

Моменты инерции относительно центра масс (граммов * квадратные миллиметры)

128377,20	13533,19	4373,88
13533,19	216535,35	3733,57
4373,88	3733,57	186086,31

Конструкция будет дорабатываться по результатам исследования динамики управления прибора.

DEVELOPMENT OF THE LASER GIMBAL OF RANGE FINDING ELECTRO-OPTICAL DEVICE IN SOLIDWORKS

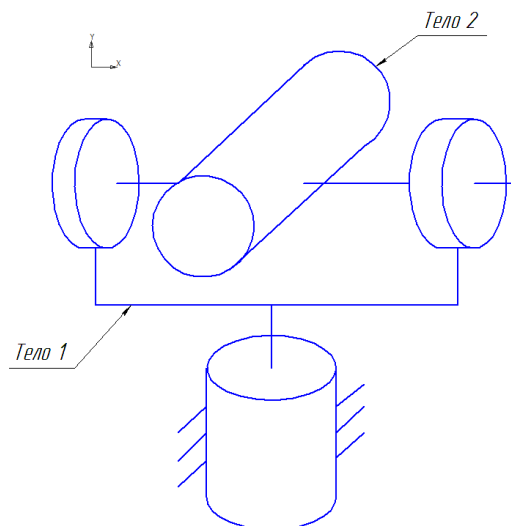
Burdinov K.A., Smirnov A.E., Karpov A.I.

(Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan)

Abstrakt

The two axis gimbal, which is located a laser rangefinder and the camera in the visible range was designed. The design allows you to control the axis of sight of the two corners within the hemisphere.

The design was developed based on the results of experimental studies of the considered analogue compact opto-electronic device (focal length 35 mm, weight 100 g., 66x66x80mm). The device is in a tough casing and placed in a two axis gimbal. Fig. 5 shows the kinematics of the gimbal.



Pic. 5. Kinematic scheme of the laser gimbal

ДИНАМИКА БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ

Крнев В.А., Молин Д.А., Карпов А.И.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Математическая модель объекта управления

Объект управления (ОУ) – бортовой оптико-электронный прибор (ОЭП) описывается системой нестационарных обыкновенных дифференциальных уравнений [1]. Возникновение нестационарных членов в этих уравнениях связано с влиянием маневра летательного аппарата (ЛА).

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} B^*(\beta) + J_{p1} & -D(\beta) \\ -D(\beta) & C_2 + J_{p2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{c_{M1}c_{e1}}{r_1} & b_{\alpha\beta}(t, \alpha, \beta) \\ -b_{\alpha\beta}(t, \alpha, \beta) & \frac{c_{M2}c_{e2}}{r_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Q_\alpha(\alpha, \beta) \\ Q_\beta(\alpha, \beta) \end{pmatrix} + \\ & + \begin{pmatrix} F_\alpha(t, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) \\ F_\beta(t, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{c_{M1}}{r_1} & 0 \\ 0 & \frac{c_{M2}}{r_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_{тр.1} \\ M_{тр.2} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

где α, β – углы поворота ОУ, u_1, u_2 – управляющие напряжения, $M_{тр.1}, M_{тр.2}$ – моменты трения по азимуту и углу места соответственно,

$$B^*(\beta) = B_1 + B(\beta), \quad B(\beta) = 0,5(A_2 + B_2) - A_2(\beta), \quad A_2(\beta) = 0,5(A_2 - B_2)\cos(2\beta) + F_2\sin(2\beta),$$

$$D(\beta) = D_2\cos\beta + E_2\sin\beta, \quad E(\beta) = -D_2\sin\beta + E_2\cos\beta, \quad A(\beta) = 0,5(A_2 + B_2) + A_2(\beta),$$

$$\begin{aligned} b_{\alpha,\beta}(t, \alpha, \beta) = & (2A_2(\beta)\cos\alpha - 2E(\beta)\sin\alpha - C_2\cos\alpha)\Omega_{X_y}(t) - 2(F_2\cos(2\beta) + \\ & 0,5(B_2 - A_2)\sin(2\beta))\Omega_{Y_y}(t) - (2A_2(\beta)\sin\alpha + 2E(\beta)\cos\alpha - C_2\sin\alpha)\Omega_{Z_y}(t); \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} Q_\alpha(\alpha, \beta) \\ Q_\beta(\alpha, \beta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 z_c^{(oy)}(\alpha, \beta) & 0 & -m_1 x_c^{(oy)}(\alpha, \beta) \\ -m_2 y_c(\beta) \cos\alpha & m_2 x_c(\beta) & m_2 y_c(\beta) \sin\alpha \end{pmatrix} A_y(\tilde{a}_{O_y}(t) + A_c \tilde{g}),$$

$$\begin{pmatrix} F_\alpha(t, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) \\ F_\beta(t, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_\alpha^*(t, \alpha, \beta) \\ f_\beta^*(t, \alpha, \beta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_\alpha(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) \\ f_\beta(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) \end{pmatrix},$$

$$f_{\alpha}^{*}(t, \alpha, \beta) = -\left(F^{*}(\alpha, \beta)\right)\left(\dot{\Omega}_{x_y}(t) + \Omega_{y_y}(t)\Omega_{z_y}(t)\right) - \left(D^{*}(\alpha, \beta)\right)\left(\dot{\Omega}_{z_y}(t) - \Omega_{x_y}(t)\Omega_{y_y}(t)\right) + \\ + B^{*}(\beta)\dot{\Omega}_{y_y}(t) + E(\alpha, \beta)\left(\Omega_{x_y}^2 - \Omega_{z_y}^2\right) + 2A_1(\alpha, \beta)\Omega_{x_y}(t)\Omega_{z_y}(t),$$

$$f_{\alpha}(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) = -2\dot{\alpha}\dot{\beta}F(\alpha, \beta) - \dot{\beta}^2E(\beta), \quad f_{\beta}(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) = \dot{\alpha}^2F(\beta).$$

$$F^{*}(\alpha, \beta) = F(\alpha, \beta) - mlx_c^{(oy)}(\alpha, \beta), \quad D^{*}(\alpha, \beta) = D(\alpha, \beta) - mlz_c^{(oy)}(\alpha, \beta),$$

$$B^{*}(\beta) = B_1 + B(\beta), \quad E(\alpha, \beta) = 0,5(A_1 + A(\beta) - C_1 - C_2)\sin(2\alpha) + (E_1 + E(\beta))\cos(2\alpha),$$

$$A_1(\alpha, \beta) = 0,5(A_1 + A(\beta) - C_1 - C_2)\cos(2\alpha) - (E_1 + E(\beta))\sin(2\alpha),$$

$$F(\alpha, \beta) = (F_1 + F(\beta))\cos\alpha + (D_1 + D(\beta))\sin\alpha,$$

$$F(\beta) = F_2\cos(2\beta) + 0,5(B_2 - A_2)\sin(2\beta),$$

$$D(\alpha, \beta) = (D_1 + D(\beta))\cos(\alpha) - (F_1 + F(\beta))\sin(\alpha), \quad D(\beta) = D_2\cos\beta + E_2\sin\beta,$$

$$x_c^{(oy)}(\alpha, \beta) = m^{-1}(m_1x_c(\alpha) + m_2x_c(\alpha, \beta)), \quad z_c^{(oy)}(\alpha, \beta) = \frac{1}{m}(m_1z_c(\alpha) + m_2z_c(\alpha, \beta)),$$

$$m = m_1 + m_2, \quad x_c(\alpha) = x_{c1}\cos\alpha + z_{c1}\sin\alpha,$$

$$x_c(\alpha, \beta) = x_c(\beta)\cos\alpha + z_{c2}\sin\alpha, \quad y_c(\beta) = x_{c2}\sin\beta + y_{c2}\cos\beta,$$

$$y_c(\beta) = x_{c2}\sin\beta + y_{c2}\cos\beta, \quad z_c(\alpha, \beta) = -x_c(\beta)\sin\alpha + z_{c2}\cos\alpha,$$

$$z_c(\alpha) = -x_{c1}\sin\alpha + z_{c1}\cos\alpha,$$

$$f_{\beta}^{*}(t, \alpha, \beta) = -E(\beta)\left(\left(\dot{\Omega}_{x_y}(t) - \Omega_{y_y}(t)\Omega_{z_y}(t)\right)\cos\alpha - \left(\dot{\Omega}_{z_y}(t) + \Omega_{x_y}(t)\Omega_{y_y}(t)\right)\sin\alpha\right) - \\ - D(\beta)\dot{\Omega}_{y_y}(t) + C^{*}(\beta)\left(\dot{\Omega}_{x_y}(t)\sin\alpha + \dot{\Omega}_{z_y}(t)\cos\alpha\right) - D^{**}(\alpha, \beta)\Omega_{x_y}(t)\Omega_{z_y}(t) + \\ + F(\beta)\Omega_{y_y}^2(t) + A_2^{*}(\beta)\left(\Omega_{y_y}(t)\Omega_{z_y}(t)\sin\alpha - \Omega_{x_y}(t)\Omega_{y_y}(t)\cos\alpha\right) - \\ - \frac{F^{**}(\alpha, \beta)}{2}\left(\Omega_{x_y}^2(t) - \Omega_{z_y}^2(t)\right) - \left(\frac{F^{*}(\beta)}{2}\right)\left(\Omega_{z_y}^2(t) + \Omega_{x_y}^2(t)\right),$$

$$C^{*}(\beta) = C_2 - m_2ly_c(\beta), \quad D^{**}(\alpha, \beta) = D(\beta)\cos(2\alpha) - F(\beta)\sin(2\alpha),$$

$$\left(\Omega_{x_y}(t)\Omega_{y_y}(t)\Omega_{z_y}(t)\right)^T = \tilde{\Omega}(t) = A_y\tilde{\omega}_{\mathcal{I}A}, \quad A_2^{*}(\beta) = 2A_2(\beta) - m_2ly_c(\beta),$$

$$F^{**}(\alpha, \beta) = F(\beta)\cos(2\alpha) + D(\beta)\sin(2\alpha), \quad F^{*}(\beta) = F(\beta) - 2m_2lx_c(\beta),$$

$$x_c(\beta) = x_{c2}\cos\beta - y_{c2}\sin\beta, \quad y_c^{(oy)}(\beta) = \frac{1}{m}(m_1y_{c1} + m_2y_c(\beta)).$$

Математическая модель регулятора и компьютерная имитационная модель бортовой системы слежения ОЭП

Регулятор лазерной локационной системы слежения (ЛЛСС) синтезирован частотным методом [2] в классе инвариантных систем с астатизмом 1-го порядка в предположении, что суммарная динамическая погрешность (ε) слежения [3] не должна превышать 6 угл.с при входных воздействиях:

$$\ddot{\alpha}_{\text{вх}}(t) = \ddot{\beta}_{\text{вх}}(t) = 120^\circ / c^2, \quad \dot{\alpha}_{\text{вх}}(t) = \dot{\beta}_{\text{вх}}(t) = 60^\circ / c.$$

Уравнения регуляторов

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1(p)(\alpha_{\text{вх}} - \alpha) + R_3(p)\psi_H, \\ u_2 &= R_2(p)(\beta_{\text{вх}} - \beta) + R_4(p)\vartheta_H, \end{aligned} \quad (2)$$

где β_H, ϑ_H – колебания носителя по азимуту и углу места.

$$\begin{aligned} R_1(p) &= \frac{K_1}{(T_{y1}p+1)} \frac{\alpha_1 p+1}{(T_{\vartheta 1}p+1)}, & R_3(p) &= \frac{K_3 p}{(T_{y1}p+1)} \frac{\alpha_1 p+1}{(T_{\vartheta 1}p+1)}, \\ R_2(p) &= \frac{K_2}{(T_{y2}p+1)} \frac{\alpha_2 p+1}{(T_{\vartheta 2}p+1)}, & R_4(p) &= \frac{K_4 p}{(T_{y2}p+1)} \frac{\alpha_2 p+1}{(T_{\vartheta 2}p+1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Параметры регуляторов (α_i, K_i) выбирались таким образом, чтобы скомпенсировать влияние инерционности приводов и обеспечить устойчивость и требуемое качество регулирования. Определены требуемые добротности регуляторов по скорости при обеспечении точности инвариантности ($\delta_i = 0,05$) к колебаниям ЛА комбинированных САУ:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_1}{k_{V1}} \dot{\alpha}_{\text{вх}}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\delta_2}{k_{V2}} \dot{\beta}_{\text{вх}}. \quad (5)$$

Компьютерная имитационная ЛЛСС, разработанная в соответствии с (1)-(4) и параметрами ОУ, представлена на рис. 1. Параметры ПИ-регуляторов ЛЛСС синтезированы, исходя из (3)-(5)

$$k_{V1} = \frac{\delta_1}{\varepsilon_{1\text{доп}}} \dot{\alpha}_{\text{вх}} = \frac{0,05 \cdot 60 \cdot 3600}{4} = 2700 c^{-1}, \quad k_{V2} = \frac{\delta_2}{\varepsilon_{2\text{доп}}} \dot{\beta}_{\text{вх}} = 2700 c^{-1},$$

$$K_1 \geq \frac{k_{V1}}{\kappa_{n1}} = \frac{2700}{0,1723} = 15670 \frac{B}{\text{рад}} \rightarrow 16000 \frac{B}{\text{рад}},$$

$$K_2 \geq \frac{k_{V2}}{\kappa_{n2}} = \frac{2700}{0,523} = 5163 \frac{B}{\text{рад}} \rightarrow 6000 \frac{B}{\text{рад}}.$$

На рис. 2 представлены типовые фрагменты результатов экспериментальных исследований КИМ ЛЛСС ОЭП.

Исследование влияния нестационарных перекрестных связей и дисбаланса показало, что существенное влияние на динамику слежения оказывает дисбаланс ОУ, находящегося в двухступенном кардановом подвесе. При дисбалансе ОУ по азимуту (1,7 мм) и углу места (-2 мм) установившаяся погрешность смещения оптической оси прибора во время слежения составляет: 55 ± 70 угл.с.

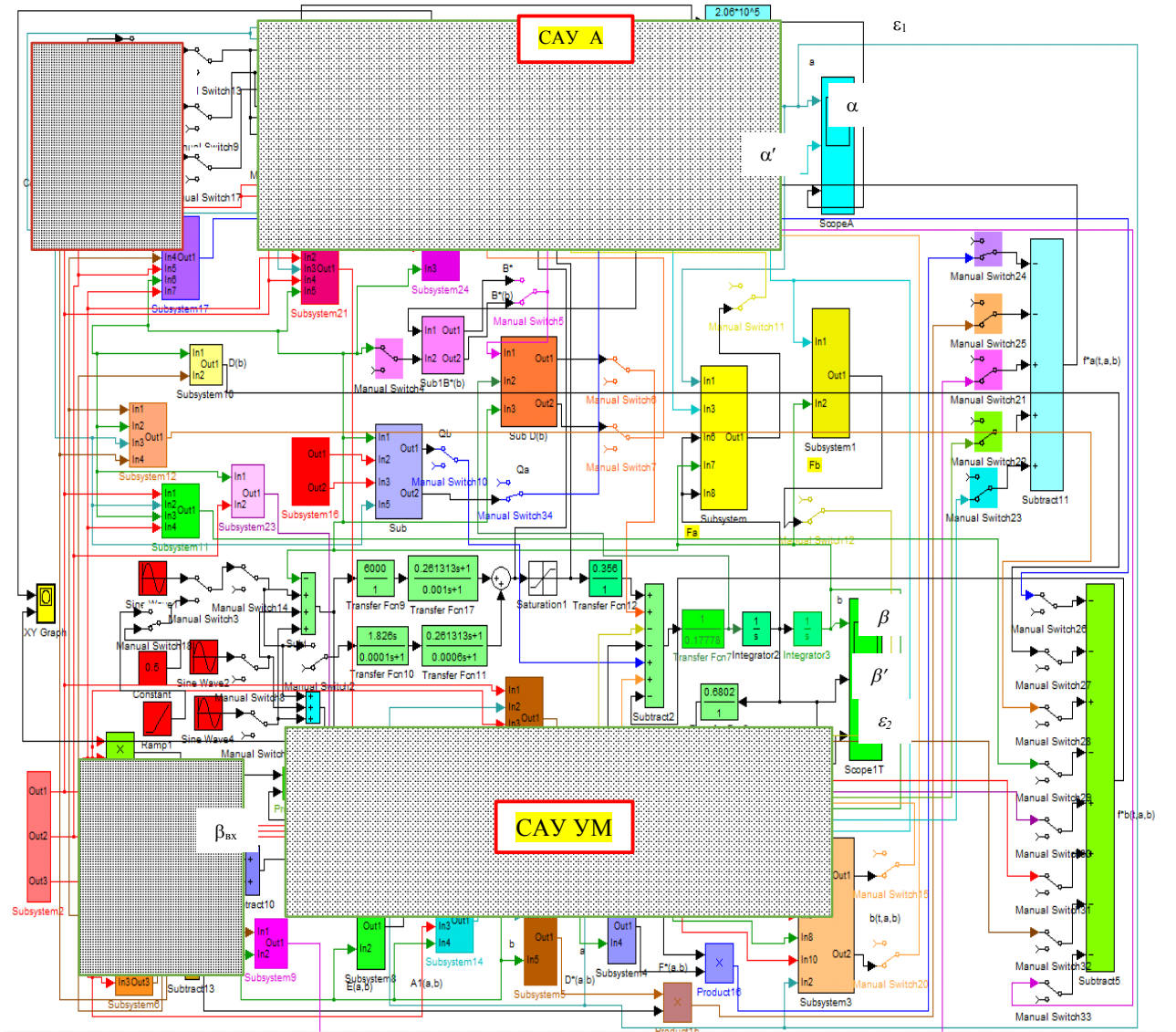


Рис. 1. Структурная схема КИМ СС ОЭП

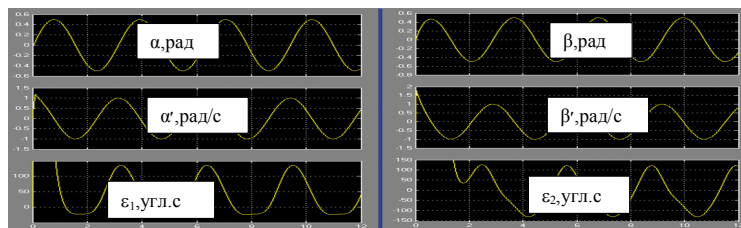


Рис. 2. Переходные и установившиеся процессы слежения ОЭП (a – ЛЛСС по азимуту; b – ЛЛСС по углу места) при колебаниях носителя: $\alpha_{\text{вх}}(t) = 0,523 \sin(2t)$, $\beta_{\text{вх}}(t) = 0,523 \sin(2t + 0,52)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аппель П.* Теоретическая механика. Т. 2. Динамика системы. Аналитическая механика. М., гос. изд-во ФМЛ, 1960. 487 с.
2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

3. Карпов А.И. Стрежнев В.А. Динамика и методы расчета систем автоматического управления стратосферных обсерваторий: Идентификация, декомпозиция, синтез: Монография. Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. 175 с.

DYNAMIC OF ONBOARD LASER RADAR TRACKING SYSTEM

Krenev V.A., Molin D.A., Karpov A.I.

(Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI)

Abstrakt

This article investigates control dynamics of onboard laser radar tracking system (LRTS). Mathematical and computer models of the control loops, control algorithms are proposed, results of dynamics study shown.

Keywords: control system, on-board optoelectronic system, mathematical and computer models, control algorithms, dynamic.

Control object (CO) – onboard optoelectronic device in two-stage gimbal is described with system of ordinary differential equations of the 4th order. LRTS regulators are synthesized by frequency method in the class of invariant systems. The regulators parameters (α_i, K_i) were chosen so as to compensate effect of drives inertia and to ensure the stability and required quality of regulation. Required quality factors for speed of regulators are synthesized with an accuracy of invariance $(\delta_i = 0,05)$ to fluctuations of aircraft. Computer model of LRTS was developed. As investigation of non-stationary cross-linking and imbalance influence found the imbalance of CO has significant impact on tracking dynamics. When imbalance of CO is 1,7 mm in azimuth and –2 mm in elevation steady error of device optical axis offset is 55 ± 70 arc seconds.

ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ В СОСТАВЕ БАЗОВОГО МОДУЛЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Муслимов Э.Р., Насыров А.Р., Скочиллов А.Ф.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

Применение гиперспектральных приборов для задач зондирования земной поверхности в интересах экологии, сельского хозяйства, мониторинга утечек газов позволяет проводить анализ получаемой информации на принципиально новом уровне: выявлять узкие линии поглощения, характерные для минеральных веществ, газов и воды, проводить их идентификацию и определять концентрацию; получать количественные оценки спектральных характеристик подстилающей поверхности и конкретных наземных объектов.

В последнее десятилетие быстрое продвижение технологий матричных приемников и компьютерных методов обработки сигнала привели к созданию гиперспектральных видеоспектрометров или изображающих спектрометров, в которых для каждого пикселя изображения наблюдаемой сцены на фотоприемнике регистрируется непрерывный спектр с высоким разрешением и в широком спектральном диапазоне. Таким образом, к обычным двум пространственным координатам изображения объекта добавляется третья, спектральная координата. Видеоспектрометры позволили радикально увеличить информационные возможности приборов, формирующих изображение. Вследствие наличия подобных систем представилась возможность каждый наблюдаемый объект идентифицировать по его спектральному «отпечатку».

В ОАО «НПО ГИПО» был разработан и создан оптический блок базового модуля гиперспектрометра с высоким пространственным разрешением ближнего ИК-диапазона (ГС-ВР-БИК), который является составной частью гиперспектрометра высокого разрешения (ГС-ВР), предназначенного для съемки поверхности Земли с борта космического аппарата. ГС-ВР-БИК предназначен для установки на космическом аппарате с целью съемки земной поверхности в 40 спектральных каналах одновременно в спектральной полосе 0,9 – 1,7 мкм с разрешением 60 м при высоте съемки 500 км. ГС-ВР-БИК имеет следующие технические характеристики:

Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,9 – 1,7
Системное фокусное расстояние, мм	250
Диаметр входного зрачка, не менее, мм	120
Угол поля зрения «по ширине захвата», °	3,5
Спектральное разрешение, нм	10 – 50
Угловое разрешение, угл. сек.	26
Спектральная развертка на фоточувствительной матрице, мм	2,4
Сбор энергии в пикселе 30 × 30 мкм, не менее (без учета потерь на экранирование и пропускание оптического блока), %	90 % от дифракционного предела
Интегральный коэффициент пропускания оптического блока (без учета потерь на дифракционной решетке), не менее	0,9
Рабочий диапазон температур, °С	+10 ÷ +30

В качестве входного объектива используется аналог триплета Кука. Оптическая система входного объектива является внеосевой и децентрированной как по апертуре, так и по полю, что обеспечивает отсутствие центрального экранирования. Первое и третье зеркала – внеосевые, второе зеркало – осевое. Поверхности всех трех зеркал асферические. Спектральный блок

преобразует полихроматическое изображение щели в двумерный массив и проецирует его на фотоприемную матрицу (по одной из осей матрицы реализуется развертка по пространству, по другой – по спектру). Спектральный блок гиперспектрометра построен по хорошо зарекомендовавшей себя схеме Оффнера, которая состоит из вогнутого сферического зеркала ($R = 258,8$ мм) и отражающей дифракционной решетки на выпуклой сфере ($R = 130,62$ мм). Частота дифракционной решетки, нанесенной на выпуклой сферической поверхности, равна 24 лин/мм, угол падения по всей апертуре решетки составляет 29° , отражающее покрытие – алюминий.

Дифракционная эффективность (ДЭ) решетки, определяемая как отношение потока энергии монохроматического света, дифрагированного в первый порядок дифракции, к потоку энергии падающего на решетку излучения, зависит как от материала отражающего слоя, так и формы профиля штрихов решетки.

Показатели преломления и коэффициенты поглощения алюминия, необходимые для расчета ДЭ решеток, были взяты из [1]. Расчет ДЭ для неполяризованного оптического излучения при угле падения на решетку $\theta = 29^\circ$ и диапазона длин волн от 0,9 мкм до 1,7 мкм проведен на основе строгого решения уравнений Максвелла численными дифференциальными методами [2-3].

Для нарезных дифракционных решеток, изготавливаемых в ОАО «НПО ГИПО», характерны два вида профилей: треугольная форма штриха (эшелет), определяемая углом блеска, и прямоугольная, определяемая высотой штриха h .

Эшелеты позволяют концентрировать максимум дифрагированного света в одном направлении, поэтому их эффективность выше, чем у симметричных решеток с прямоугольным профилем. Однако очень трудно нарезать на выпуклой сферической поверхности эшелет с таким малым углом блеска.

Другим недостатком нарезных решеток является наличие ложных спектральных линий («духов») и значительного рассеянного света. Поэтому использование голографических решеток с синусоидальным профилем штрихов высотой h может оказаться более предпочтительным, поскольку они не дают рассеянного света и не имеют «духов», хотя и обладают более низкой дифракционной эффективностью по сравнению с эшелетами.

Поэтому для оптического блока гиперспектрометра ГС-ВР-БИК были изготовлены именно голографические дифракционные решетки с синусоидальным профилем штриха, которые обеспечили требуемые технические характеристики разработанного спектрального прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marvin J. Weber* «Handbook of Optical Materials», CRC Press, 2003.
2. *Lifeng Li*. «Multilayer-coated diffraction gratings: differential method of Chandezon et al. revisited», *J. Opt. Soc. Am.* 11, p. 2816-2828 (1994).
3. *Lifeng Li, Granet G., Plumey J.P., and Chandezon J.* «Some topics in extending the C method to multilayer gratings of different profiles», *Pure Appl. Opt.* 5. P. 141-156 (1996).

DIFFRACTION GRATINGS IN A BASE MODULE OF A HIGH SPATIAL RESOLUTION HYPERSPPECTROMETER IN THE NEAR IR REGION

Muslimov E.R., Nasyrov A.R., Skochilov A.F.

(OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan)

The paper deals with some types of holographic and ruled diffraction gratings, which are part of a spectrometer according to the scheme of Offner, designed for use in a base module of a high resolution hyperspectrometer for a satellite survey of the Earth surface.

The spectral unit, with a diffraction grating being located on sphere, transforms the polychromatic image of the slit into a two-dimensional array and projects it on a photodetector array (space scanning is performed along one of the axes, and spectral scanning is performed along another). The diffraction efficiency has been calculated for the nonpolarized optical radiation at an angle of incidence on the grating $\theta = 29^\circ$ and in the wavelength region from 900 nm to 1700 nm on the basis of a rigorous solution of the Maxwell equations by numerical differential methods.

At OJSC NPO GIPO, there have been manufactured holographic diffraction gratings featuring a sinusoidal groove profile which provided the developed spectral device with the required specifications.

НАРЕЗНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СПЕКТРОМЕТРОВ В КОНФИГУРАЦИИ ОФФНЕРА

Белокопытов А.А., Скочилов А.Ф., Чугунов Ю.П.

*(ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», г. Казань)*

Перспективными спектрометрами для использования на малых космических аппаратах являются изображающие спектрометры в конфигурации Оффнера [1–3]. Основными преимуществами таких спектрометров являются их компактный размер и возможность снижения хроматических aberrаций и дисторсии до низкого уровня. В простейшем случае спектрометр Оффнера содержит два концентрических зеркала. В качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решётка, выполненная на одном из зеркал. Использование дифракционной решётки позволяет достичь большей компактности и меньших хроматических aberrаций.

Наиболее сложным в реализации элементом спектрального прибора является дифракционная решётка спектрографа, выполненная на выпуклом сферическом зеркале. Основными технологиями выполнения таких решёток являются нарезка на специальной делительной машине и голографическая литография. В России обе технологии представлены в ОАО «НПО ГИПО» (г. Казань), входящем в холдинг «Швабе».

Существуют различные способы управления распределением энергии по дифракционным порядкам для дифракционных решёток. Бинарные решётки наиболее технологичны при изготовлении методами литографии, но могут давать лишь симметричные порядки, поэтому их энергетическая эффективность ограничена. Наибольшую энергетическую эффективность, сосредоточенную в одном дифракционном порядке, обеспечивают решётки с треугольным профилем (решётки «с блеском»), но они наиболее сложны с технологической точки зрения.

ОАО «НПО ГИПО» имеет необходимое оборудование и опыт изготовления выпуклых и вогнутых дифракционных решёток [4]. Для пространственных частот в десятки линий на миллиметр, которые должны быть реализованы для рассчитанного спектрометра, оптимальной является технология нарезки.

На выпуклой сферической поверхности была выполнена дифракционная решетка с частотой 60 лин/мм (период $\Lambda = 16,67$ мкм). Щель спектрометра шириной 15 мкм была изготовлена на фотопостроителе фирмы CLWS-200 в виде маски из хрома. ПЗС-камера имеет 2048·1526 пикселей, размер чувствительной области – 5·6,55 мм, размер пиксела – 3,5 мкм. При испытаниях макета спектрометра такой малый размер пиксела позволяет более подробно изучить пятно рассеяния.

Было изготовлено две решетки с алюминиевым покрытием. На первой решетке было выполнено два участка с разными профилями (1 и 2), один из которых был получен путём дополнительного жидкостного травления нарезанного профиля. Графики профилей 1 и 2, а также график профиля 3 на второй решетке, были получены путём обработки измерений, проведённых на микроинтерферометре Zygo New View 7000. Травление привело к полному удалению зубца высотой около 2 мкм, присутствующего на непротравленном профиле. Кроме того, появились весьма значительные шумы, видимо, травление было неизотропным. И визуально протравленный участок имел слегка матовую поверхность.

Дифракционная эффективность (ДЭ) решетки, определяемая как отношение потока энергии монохроматического света, дифрагированного в -1 порядок дифракции, к потоку энергии падающего на решетку излучения, зависит как от материала отражающего слоя, так и формы профиля штрихов решетки.

Для расчета дифракционной эффективности решеток измеренные профили 1, 2 и 3 были аппроксимированы ступенчатыми функциями.

Расчет ДЭ для неполяризованного оптического излучения при угле падения на решетку $\theta = 18^\circ$ и диапазона длин волн от 430 нм до 630 нм проведен на основе строгого решения уравнений Максвелла численными дифференциальными методами.

Зависимость ДЭ от длины волны света для профиля 1, из-за несимметричности данного профиля, различна для случаев, когда штрихи решетки ориентированы по разному по отношению к падающему пучку (варианты А и В). Максимальная ДЭ достигается либо в длинноволновой части выбранного спектрального диапазона (вариант А), либо в коротковолновой части (вариант В).

Для симметричного профиля 2 зависимость ДЭ от длины волны имеет оптимальную гладкую форму.

Для профиля 3 с узкой высокой ступенькой зависимость ДЭ от длины волны дает худшие значения.

Таким образом, симметричный профиль 2, имеющий высоту ступени порядка 140 нм, наиболее предпочтителен для данного спектрометра Оффнера в диапазоне длин волн 430÷630 нм.

Аберрационные характеристики спектрометра позволяют использовать его в более широком диапазоне от 400 нм до 1050 нм (видимая и ближняя ИК области спектра), если будет достигнута оптимальная форма профиля штрихов решетки (прямоугольная с высотой 150 нм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mouroulis P., Wilson D.W., Maker P.D., Muller R.E.* Convex grating types for concentric imaging spectrometers // *Applied Optics*. – 1998. – Vol. 37(31). – P. 7200-7208.
2. *Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Карсаков А.В., Хонина С.Н.* Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38. № 2. – С. 271-280.
3. *Карпеев С.В., Хонина С.Н., Харитонов С.И.* Исследование дифракционной решетки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.
4. *Знаменский М.Ю., Лукашевич Я.К., Скочилов А.Ф., Федулова Н.А.* Пропускающие нарезные дифракционные решетки для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра // *Оптический журнал*, 2014. № 3. С. 51-54.

RULED DIFFRACTION GRATINGS FOR IMAGING SPECTROMETERS IN THE CONFIGURATION OF OFFNER

Belokopytov A.A., Skochilov A.F., Chugunov Yu.P.

(OJSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan)

The study covers the dependence of the diffraction efficiency of ruled gratings, whose groove density was 60 lines per mm, ruled on the convex mirror surface, on the groove profile shape. These gratings were developed at OJSC «NPO GIPO» for use in the spectrometer according to the scheme of Offner in the spectral region of 430÷630 nm. The groove profile shape was measured by means of microinterferometer Zygo New View 7000.

In order to calculate the diffraction efficiency of ruled gratings, the measured profiles were approximated by step functions. The calculation was done on the basis of a rigorous solution of the Maxwell equations by numerical differential methods for the nonpolarized optical radiation at an angle of incidence on the grating $\theta = 18^\circ$.

The paper shows that the aberration characteristics of the spectrometer allow to use it in a wider wavelength region from 400 nm to 1050 nm provided the optimal shape of the grating groove profile (rectangular, 150 nm high) is obtained.

ВАРИАНТЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ КАНАЛОВ СПЕКТРОМЕТРА С ПРОПУСКАЮЩИМ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Гуськов И.А.

(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Ряд измерительных задач, в частности задачи дистанционного зондирования, требуют одновременной регистрации изображения наблюдаемого объекта и спектра его излучения. Реализовать подобный режим измерений можно, используя оптическую систему с комплексированием каналов [1, 2].

Рассмотрим два варианта реализации подобных схем: с внутренним диспергирующим устройством – пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решеткой (ПВГДР); и с внешним диспергирующим устройством представленным – гризмой (комбинация пары призм и плоской пропускающей дифракционной решетки.)

В первой схем ПВГДР выполняет функции диспергирующего устройства и светоделителя [2]. Она устанавливается после последней поверхности объектива и в нулевом порядке дифракции работает как дополнительная линза изображающего канала. При этом в первом порядке дифракции она формирует спектр в заданном диапазоне длин волн. Разделение изображающего и спектрального каналов осуществляется сменой диафрагм в плоскости промежуточного изображения объектива.

Согласно описанной концепции была рассчитана схема комплексированного спектрометра для видимого диапазона. Основные характеристики схемы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры спектрометра с ПВГДР

Полное поле зрения 2ω	14°
Относительное отверстие F/#	4,5
Рабочая длина волны $\lambda_{\text{раб}}$, мкм	525
Фокусное расстояние F', мм	140
Длина изображения спектра $L_{\text{сп}}$, мм	13,1
Рабочий спектральный диапазон λ , нм	400-700
Расстояние от дифракционной решетки до изображения щели d , мм	60
Длина системы $L_{\text{сист}}$, мм	400

На рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема спектрометра, где 1 – входной объектив; 2 – проекционный объектив; 3 – мениск с нанесенной ПВГДР; 4 – плоскость регистрации изображения; 5 – плоскость регистрации спектра; 6 – плоскость промежуточного изображения.

Изображающий канал рассчитанной схемы обеспечивает разрешение 8,1 лин/мм на краю поля зрения и 17,8 лин/мм в его центре. Для оценки разрешения спектрального канала использовались аппаратные функции (АФ) представленные на рис. 2. Ширина диафрагмы спектрального канала принималась равной 100 мкм. Спектральное разрешение составляет 1,1 нм на длинах волн 550 и 400 нм и 2,1 нм на длине волны 700 нм.

Рассчитанная схема обеспечивает сравнительно высокое качество изображения в обоих каналах, а также имеет компоновку, близкую к осевой, что обеспечивает отсутствие необходимости юстировки осей визирования обоих каналов и высокую устойчивость к внешним воздействиям. Однако реализация подобной схемы требует использование оригинального объектива.

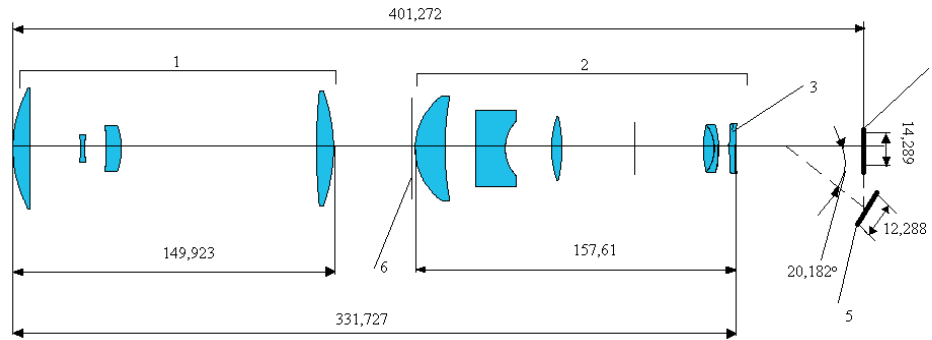


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра с ПВГДР

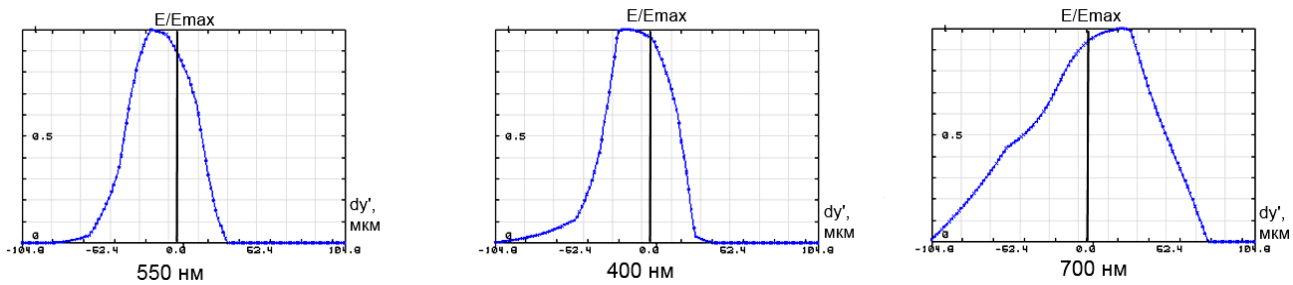


Рис. 2. Аппаратные функции спектрометра с ПВГДР

Рассмотрим второй вариант реализации схемы спектрометра с комплексированием каналов – установку призмы [3] в параллельном ходе лучей перед изображающей оптической системой. При этом разделение каналов обеспечивается, во-первых, выбором светового размера призмы, который составляет 1/5 диаметра входного зрачка системы, а во-вторых, разворотом последней грани призмы в сагиттальной плоскости. Такая система позволит одновременно формировать изображения и спектры малоразмерных объектов на контрастном фоне, например звезд. Рассмотрим оптическую схему спектрометра на базе трехзеркального телескопа без центрального экранирования, построенную по описанному принципу.

Таблица 2

Параметры спектрометра с призмой

Полное поле зрения 2ω	1,75°
Относительное отверстие F/#	4,5
Рабочая длина волны $\lambda_{\text{раб}}$, мкм	525
Фокусное расстояние F' , мм	250
Длина изображения спектра $L_{\text{сп}}$, мм	20
Рабочий спектральный диапазон, λ , нм	400-700
Длина системы $L_{\text{сист}}$, мм	400

Оптическая схема спектрометра приведена на рис. 3, а, б, в показаны эскизы призмы (вид сверху и сбоку, соответственно). На рисунке обозначены: 1 – первая призма; 2 – дифракционная решетка; 3 – вторая призма.

Изображающий канал системы обеспечивает дифракционное качество изображения. Спектральное разрешение во втором канале составляет 2,5 нм на длинах волн 550 и 400 нм и 2,7 нм на длине волны 700 нм. Графики АФ представлены на рис. 4 (угловой размер объекта равен 4,1").

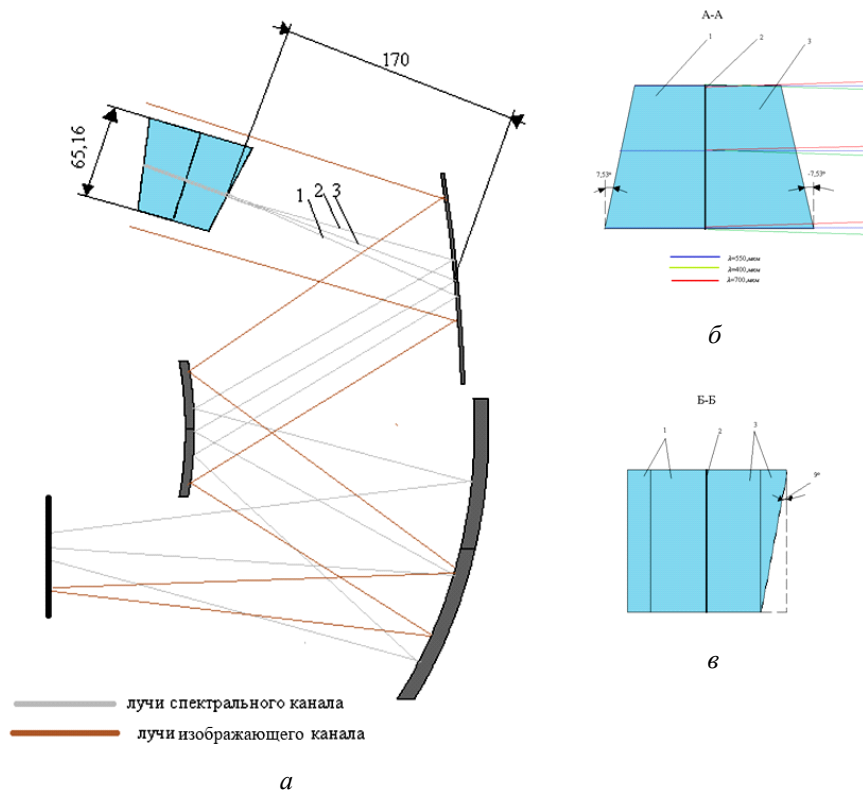


Рис. 3. Схема спектрометра с ПВГДР

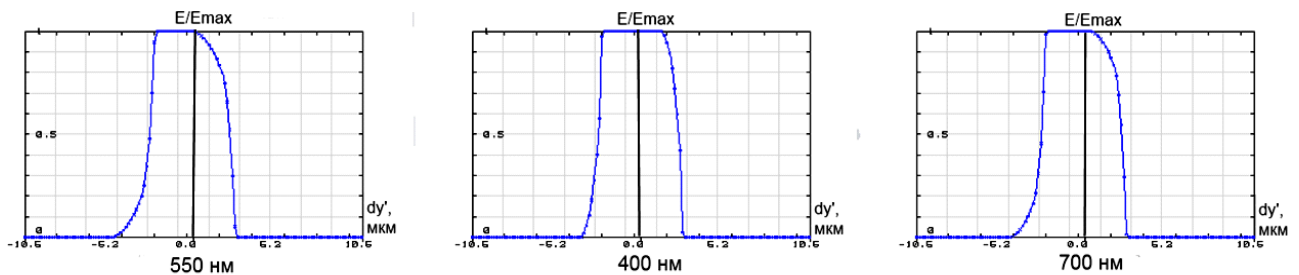


Рис. 4. Аппаратные функции спектрометра с призмой

Таким образом, в настоящей работе предложено два варианта построения оптической схемы с комплексированием изображающего и измерительного каналов. В первом варианте используется ПВГДР, установленная внутри изображающей системы, во втором – призма, расположенная перед изображающей системой. Оба варианта проиллюстрированы конкретными оптическими схемами. Достигаемое в каждом из каналов разрешение подтверждено результатами моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.Г. и др. Авиационный гиперспектрометр: архитектура и методика расчета элементов // 5 Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – М.: ИКИ РАН, 2007. – С. 280-287.
2. Muslimov E.R. A built-in spectrograph with transmission concave holographic grating // Proc. 3rd EOS Conf. on Manufacturing of Optical Components, Munich, 2013.
3. Aikio M. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph, PhD thesis – Linnanmaa, 2001. – 114 p.

OPTIONS OF INTEGRATIONS OF CHANNELS IN A SPECTROMETER WITH TRANSMISSION HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENT

Guskov I.A.

*(Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan)*

For a number of measurement tasks like remote sensing it's required to record the object image and spectrum of its' irradiation simultaneously. Such measurement can be implemented by using of an optical system with integrated channels [1, 2].

We consider two possible concepts of such integrated scheme. In the first one a transmission concave holographic grating is mounted inside an imaging optical system. In the first order of diffraction it forms the spectrum, while in the zeroth order it works as a simple meniscus inside the imaging channel. To exemplify this concept we present optical scheme of integrated spectrometer for the visible domain 400-700 nm. The imaging channel has focal length of 140 mm, F/# is 4,5 and FOV is 14°. Its' resolution reaches 17,8 lines/mm. The spectral channel creates spectrum image with length of 13.1 mm and provides spectral resolution 1,1-2,1 nm. The fields of view of the two channels are separated by means of a movable diaphragm located in the intermediate image plane.

In the second optical scheme a grism (prism-grating-prism assembly) is mounted in front of the optical system. If the grism aperture is smaller than the system aperture and the last surface of the grism is inclined in the sagittal plane, it's possible to record images and spectra of point objects (like stars) separately at the same time. We consider such scheme based on three-mirror anastigmatic telescope. The focal length is 250 mm, F/# is 4,5 and FOV is 1,75°. The spectral channel works in the range of 400-700 nm again and the spectrum length is 20 mm. The imaging channel is diffraction-limited, while the spectral channel has resolution of 2,5-2,7 nm.

Thus two possible versions of optical schemes with integration imaging and spectral channels are presented. Each of them is demonstrated on a certain example. The schemes performance is supported by modeling results.

REFERENCES

1. *Orlov A.G. et al.* Airborne hyperspectrometer: architecture and method for the components design // 5th All-Russian conf. «Modern problems of remote sensing of Earth from the space». – Moscow.: RAS ISR, 2007. – P. 280-287.
2. *Muslimov E.R.* A built-in spectrograph with transmission concave holographic grating // Proc. 3rd EOS Conf. on Manufacturing of Optical Components, Munich, 2013.
3. *Aikio M.* Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph, PhD thesis – Linnanmaa, 2001. – 114 p.

ДВУХДИАПАЗОННЫЙ СПЕКТРОГРАФ С ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Бурмистров В.А.

(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

В настоящее время спектральные приборы применяются во множестве отраслей человеческой деятельности: медицине, производстве, обеспечении экологической безопасности, криминалистике и т.д. К тенденциям развития современных спектральных приборов можно отнести их миниатюризацию, расширение рабочего спектрального диапазона и увеличение спектрального разрешения. В статичной оптической схеме не всегда удается достичь всех перечисленных характеристик одновременно. Одним из путей расширения рабочего спектрального диапазона прибора при сохранении его габаритов и дисперсии является разбиение рабочего диапазона на несколько интервалов, каждый из которых регистрируется при определенном положении диспергирующего элемента или фотоприемника. В настоящей работе рассматривается возможность создания подобного прибора, называемого иногда монографом [1], на базе вогнутой голограммной дифракционной решетки.

Существует несколько возможностей для реализации подобной схемы. В [1] описана методика расчета схемы двухдиапазонного спектрографа на базе вогнутой голограммной дифракционной решетки (ВГДР) с коррекцией aberrаций. Условия минимизации дефокусировки на плоскости, записанные для двух спектральных диапазонов, имеют вид:

$$\begin{aligned} 2H_1a_{31}/(\sin i_1 - \sin i_2) - a_{11}/(3d'_{cp}) - 2a_{21} &= 0; \\ H_1a_{41}/(\sin i_1 - \sin i_2) - a_{51} - a_{31}/d'_{cp} &= 0; \\ 2H_1a_{32}/(\sin i_1 - \sin i_2) - a_{12}/(3d'_{cp}) - 2a_{22} &= 0; \\ H_1a_{42}/(\sin i_1 - \sin i_2) - a_{52} - a_{32}/d'_{cp} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где d'_{cp} – расстояние от вершины решетки до плоскости спектра, H_1 – первый коэффициент голографирования, определяющий дефокусировку, a_{ij} – коэффициенты, зависящие от радиуса поверхности решетки, координат центра входной щели и середины спектра. Дополнив уравнения (1) условиями можно определить параметры схемы работы решетки и три первых коэффициента голографирования, и далее – параметры записи голограммной решетки.

Альтернативным решением является использование классической вогнутой решетки с достаточно большим радиусом поверхности. В этом случае спектр будет фокусироваться на пологой цилиндрической поверхности, участок которой может быть совмещен с плоскостью приемника со сравнительно малой дефокусировкой. Такой подход ведет к снижению спектрального разрешения и значительному росту астигматизма спектрографа, однако он легче может быть реализован на практике в виду доступности множества стандартных классических решеток.

В качестве примера рассмотрим схему спектрографа со следующими параметрами: рабочий спектральный диапазон – 440-760 нм (два интервала – 440-600 и 600-760 нм), радиус 150 мм, длина изображения спектра – 29 мм, обратная линейная дисперсия – 5,5 нм/мм, эквивалентное относительное отверстие – 1:7,6.

Параметры голограммной решетки определяем, комбинируя описанную выше аналитическую методику и численную оптимизацию. В результате для длины волны 488 нм (аргоновый лазер) получаем следующие координаты источников записи – (377,3 мм; 69,919°) и

(162,4 мм; 24,034°). Частота штрихов в вершине при этом составляет 1090 штр/мм. Схема спектрографа с такой решеткой приведена на рис. 1.

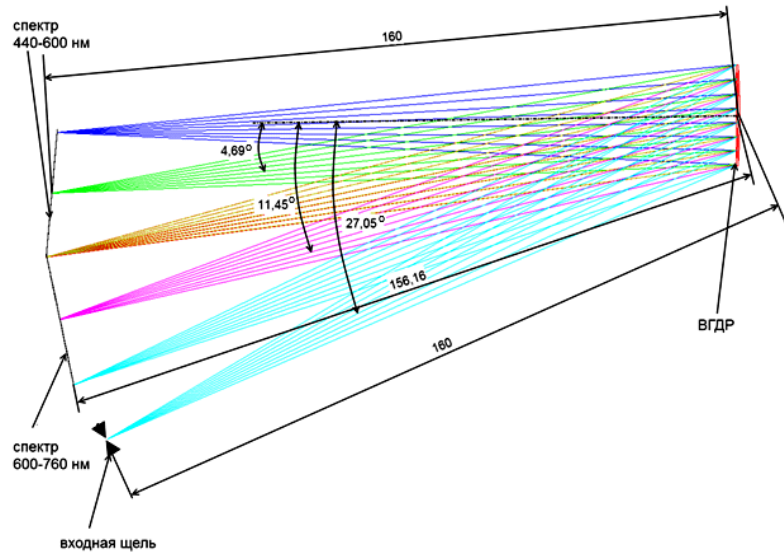


Рис. 1. Оптическая схема двухдиапазонного спектрографа с ВГДР

Аппаратные функции спектрографа для щели шириной 100 мкм приведены на рис. 2. Спектральное разрешение по полуширине АФ составляет 0,55 нм для всего диапазона.

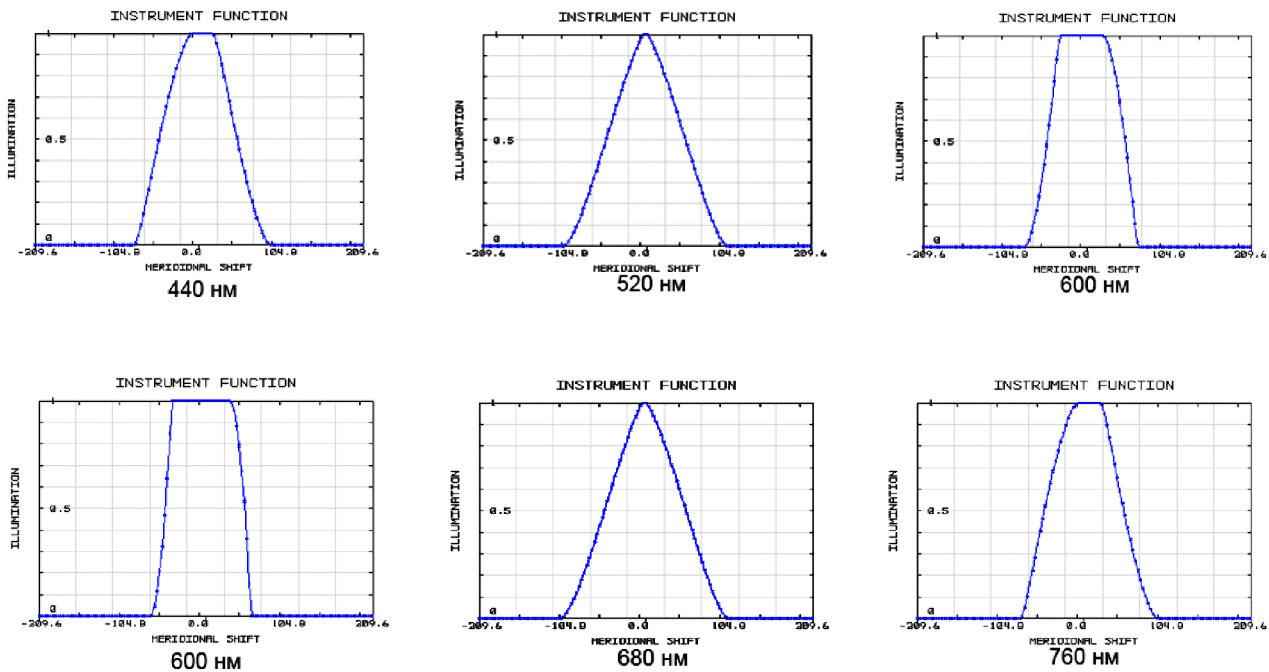


Рис. 2. Аппаратные функции спектрографа с ВГДР.
Вверху – АФ для интервала 440-600 нм; внизу – АФ для интервала 600-760 нм

Аналогичная схема на круге Роуланда использует классическую вогнутую решетку с частотой штрихов 1200 штр/мм. Принципиальная оптическая схема для данного варианта представлена на рис. 3.

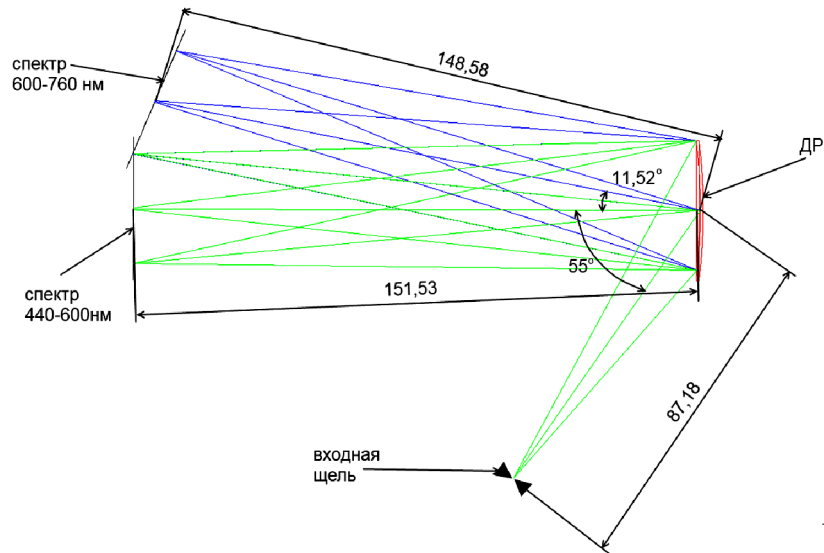


Рис. 3. Оптическая схема двухдиапазонного спектрографа с классической решеткой

Аналогично приведем АФ спектрографа для щели шириной 100 мкм (рис. 4) Спектральное разрешение составляет 0,8-1,1 нм. Отметим, что астигматическое удлинение изображения точки в этом случае достигает 24 мм, в то время как для ВГДР данное значение не превосходит 0,32 мм.

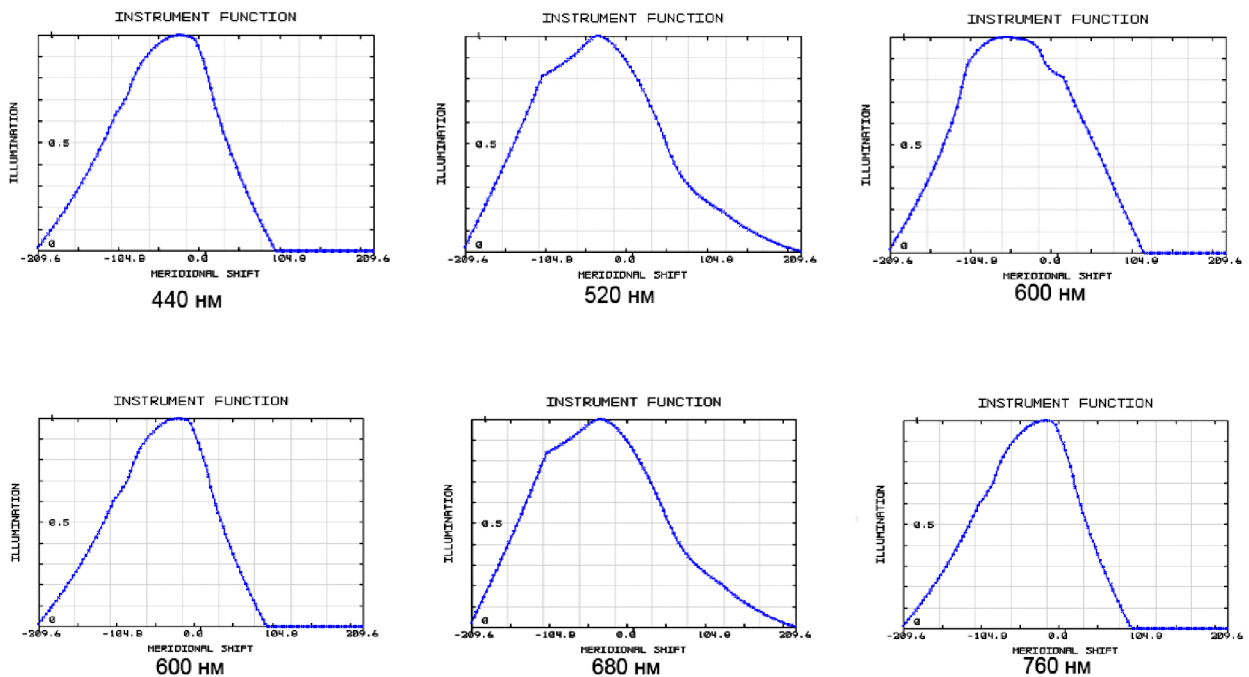


Рис. 4. Аппаратные функции спектрографа с классической решеткой.
Вверху – АФ для интервала 440-600 нм; внизу – АФ для интервала 600-760 нм

Таким образом, разработано два варианта оптической схемы двухдиапазонного спектрографа для видимого диапазона. Проведено моделирование каждой схемы и определены показатели качества изображения, продемонстрированы преимущества использования ВГДР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та., 2003. – 198 с.

DUAL-BAND SPECTROGRAPH WITH A HOLOGRAPHIC GRATING

Burmistrov V.A.

*(Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan)*

Such tendencies as miniaturization, widening of working spectral range and increasing of spectral resolution are inherent to modern spectral instruments. Sometimes it is not possible to achieve all of these characteristics at the same time in a static optical scheme. One of the ways of widening of the spectral range together with maintenance of the instrument size and dispersion is division of the working range to a number of sub-ranges. Each of them is registered in a certain position of movable dispersion component or detector. In the present article we consider development such device, which is called also “monograph”, on the basis of concave holographic grating.

There are two possible implementation of such scheme. The first one is described in [1] and uses an aberration-corrected holographic grating. The second option is use of classical concave grating with large radius of curvature.

We consider two optical schemes of dual-band spectrograph for visible domain with the following parameters: working spectral range – 440-760 nm (2 sub-ranges – 440-600 and 600-760 nm), grating surface radius 150 mm, spectrum length – 29 mm, reciprocal linear dispersion – 5,5 nm/mm, equivalent $f/\#$ – 1:7,6.

For the both of the schemes computer modeling was performed. It was shown that when a holographic he spectrum. In the scheme with classical grating the spectral resolution is between 0,8 and 1,1 nm. In addition the point image astigmatic stretch is as big as 24 mm for the classical grating, while for the holographic one it's 0,32 mm only.

Thus in the present work two options of optical scheme for a dual-band spectrograph working in the visible domain were developed. Computer modeling results are provided for each of the schemes and image quality is defined. Advantages of the scheme with holographic concave grating are shown.

REFERENCES

1. Pavlycheva N.K. Spectral instruments with non-classical diffraction gratings – Kazan: KSTU, 2003. – 198 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПОГЛОЩЕНИЯ NOTCH-ФИЛЬТРА

Гильфанов А.Р., Бакшаев М.А., Петрановский Н.А.

(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Аннотация

В этой статье представлены результаты экспериментальных исследований голограммного NOTCH-фильтра. Цель этого исследования это определить, как изменяются характеристики видимого света при прохождении через NOTCH-фильтр, который установлен не перпендикулярно проходящему свету. С помощью полученных данных можно определить с какой точностью необходимо устанавливать NOTCH-фильтр для получения необходимого качества исследований.

Введение

Notch-фильтры предназначены для значительного (до 10^{-6}) ослабления лазерного излучения (например, при визуальном наблюдении). Узкополосные голограммные фильтры используются в лазерной спектроскопии, для защиты фотодетекторов и глаз операторов от мощного лазерного излучения в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Notch-фильтры обладают очень узкой полосой поглощения на заданной длине волны, а их равномерно высокое пропускание вне полосы подавления позволяет обнаруживать слабые сигналы с тонкой структурой.

Notch-фильтр представляет собой объемную голограмму, записанную по схеме Денисюка во встречных пучках в светочувствительном слое, нанесенном на стеклянную пластинку. В желатиновой пленке с помощью интерференции создается периодическая структура синусоидальной модуляции показателя преломления желатины перпендикулярно поверхности пленки. После экспонирования и проявления пластинка заклеивается по всей поверхности защитным стеклом с помощью оптического клея, что придает изделию высокую стойкость к механическим повреждениям и влажной среде.

Теоретическая спектральная характеристика Notch-фильтра представлена на рис. 1.

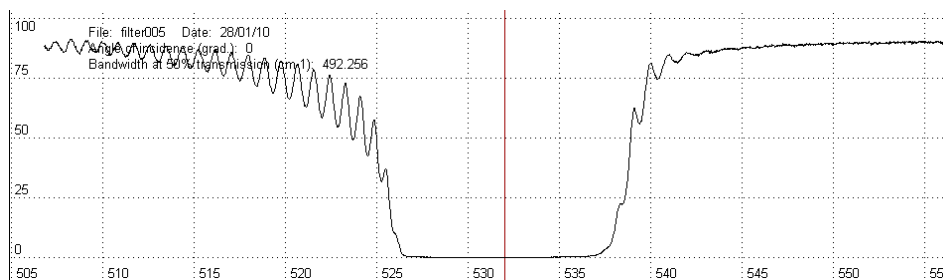


Рис. 1. Спектральная характеристика Notch-фильтра

Рабочая длина волны λ Notch-фильтра определяется длиной волны записи λ_3 и геометрией записи и восстановления и может быть выражена формулой $\lambda = \lambda_3 t \cos \alpha_1 / \cos \alpha_0$, где α_0 и α_1 – углы записи и восстановления внутри светочувствительного слоя соответственно; t – коэффициент набухания/усадки проявленного слоя.

Для проверки нашего Notch-фильтра мы использовали «Комплект спектральной аппаратуры на базе монохроматора “МДР-41” и спектрофотометр “Shimadzu UV-2550”».

Спектральная характеристика исследуемого Notch-фильтра представлена на рис. 2. I – максимальная интенсивность при прохождении через Notch-фильтр уменьшилась до 320 Кд.

Длины волн на которых интенсивность проходящего света обращается в ноль:
 $\lambda = 536 - 540$ нм.

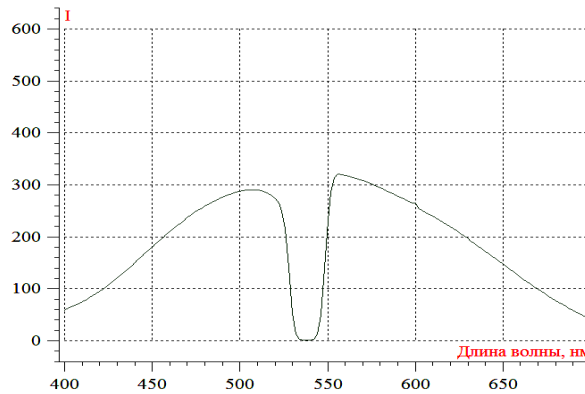


Рис. 2. Спектральная характеристика Notch-фильтра

Основная цель нашего исследования, это исследовать зависимость проходящего света (точнее его интенсивности) от положения Notch-фильтра.

На рис. 3 представлены результаты этого исследования на «Комплексе спектральной аппаратуры на базе монохроматора “МДР-41”».

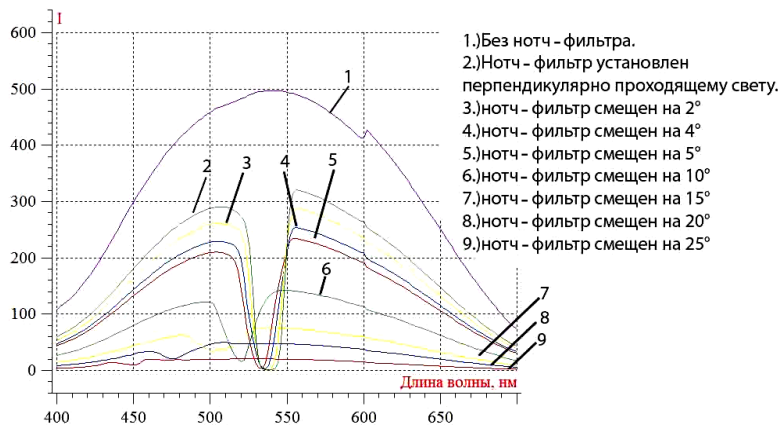


Рис. 3. Спектральная характеристика Notch-фильтра

Таблица 1

Угол поворота Notch-фильтра, град.	Максимальная интенсивность, Кд	λ_{\min} , нм	Минимальная интенсивность при λ_{\min}	$\lambda_{\text{средняя1}}$	$\lambda_{\text{средняя2}}$
Без Notch-фильтра	497	-	-	-	-
0°	320	536-540	1,52-1,59	526	546
2°	287	536-538	1,48-1,71	524	545
4°	253	536	3,10	524	545
5°	234	532-534	3,31-4,48	522	541
10°	142	518-522	14,45-18,85	509	528
15°	76	498-510	37,04-38,72	491	517
20°	50	474-476	20,38-20,93	467	483
25°	20,4	450-452	9,53-9,67	443	453

На рис. 4 представлены результаты этого исследования на спектрофотометре «Shimadzu UV-2550».

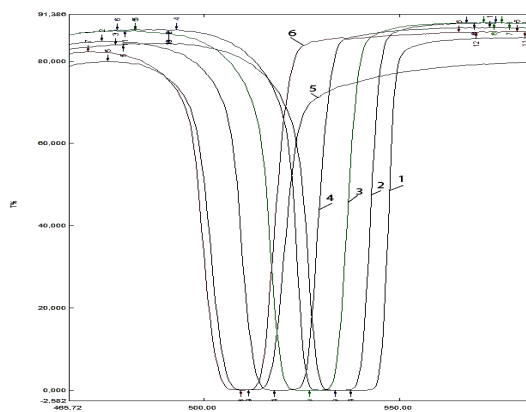


Рис. 4. Спектральная характеристика Notch-фильтра

Таблица 2

Угол поворота Notch-фильтра, град.	Максимальная интенсивность	λ_{\min} , нм	Минимальная интенсивность при λ_{\min}	$\lambda_{\text{средняя1}}$	$\lambda_{\text{средняя2}}$
0°	85,832%	536,7	0	42,52	42,32
5°	88,136%	518,8	0	44,87	47,13
10°	86,655%	533,1	0	46,71	47,93
15°	89,326%	532,3	0	48,79	49,16
20°	89,317%	527,6	0	45,37	46,35
25°	79,536%	511,3	0	43,12	38,97

В результате исследований из этих данных мы можем заключить что, для того что бы Notch фильтр поглощал нужную длину волны ($1 \pm 5\%$), он должен устанавливаться с точностью 5 градусов.

Еще одно наблюдение полученное из этих данных, это то что при повороте Notch-фильтра полоса его поглощения смещается в сторону УФ спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вендеревская И.Г., Лукин А.В., Мельников А.Н., Муслимов Э.Р., Павлычева Н.К., Петрановский Н.А., Пряхин Ю.А. Основы дифракционной оптики и голографии: учебное пособие / Под общ. ред. док. техн. наук Н.К. Павлычевой. Казань: Изд-во Казан. техн. ун-та, 2011. 188 с.

RESEARCH PROPERTIES OF BAND-STOP FILTER

Gilfanov A.R., Bakshayev M.A., Petranovskiy N.A.

(Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan)

Abstrakt

The results of experimental studies of the BAND-stop filter. This article presents the results of experimental investigations of the BAND-stop filter. The purpose of this study is to determine how to change the characteristics of visible light while passing through the NOTCH-filter, which is installed not perpendicular to the transmitted light. With these data we can determine the accuracy with which you need to install the BAND-stop filter to obtain the desired quality of research.

For our research of BAND-stop filter, we used the «Monochromator MDR-41» and a spectrophotometer «Shimadzu UV-2550».

The main results that we have received it as a change characteristics of BAND-stop filter according to the angle at which it is installed to a beam of radiation

Another conclusion derived from these data is that while Notch-filter rotation of its absorption band is shifted toward the UV spectrum.

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОГО СПЕКТРОГРАФА ДЛЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Ахметгалеева Р.Р., Муслимов Э.Р.

*(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)*

Общими требованиями к современным компактным спектрографам для задач экологического мониторинга являются высокое спектральное разрешение в широком спектральном диапазоне и высокая освещенность спектра при минимальных габаритах прибора. Кроме того, такой спектрограф должен иметь достаточно простую конструкцию и базироваться на оптических и электронных компонентах, технология изготовления и аттестации которых должна быть хорошо отработана. Указанные требования могут быть выполнены за счет введения в оптическую схему спектрографа с плоским полем на основе вогнутой голограммной дифракционной решетки (ВГДР) [1] дополнительного проекционного сферического зеркала. Поскольку в данном случае направление хода лучей изменяется дважды, будем называть подобную схему *S*-образной. В *S*-образной схеме за счет большего числа свободных коррекционных параметров можно достичь требуемой коррекции aberrаций при высокой светосиле и повышенной дисперсии. С другой стороны, требования к изготовлению компонентов и сборке схемы становятся более жесткими. Практика расчетов показывает, что допуски на параметры изготовления ВГДР в таком случае часто принимают критические значения и требуют дополнительного контроля.

Рассмотрим в качестве примера *S*-образный спектрограф со следующими параметрами: рабочий спектральный диапазон 200-1000 нм, длина схемы 58 мм, эквивалентное относительное отверстие 1:2,4 (отношение расстояния от входной щели до решетки к ее диаметру), обратная линейная дисперсия 31 нм/мм, длина спектра 27,9 мм, радиус кривизны поверхности голограммной дифракционной решетки 83,93 мм, частота штрихов в вершине 397,2 штр/мм, радиус кривизны зеркала 210,96 мм, длина волны излучения записи 441,6 нм, полярные координаты источников записи относительно вершины решетки (112,273 мм, 24°19'45'') и (118,291 мм, 12°35'57''). Указанные параметры получены в результате численной оптимизации средствами Zemax. Оценочная функция включала поперечные aberrации лучей на средней и крайней длинах волн рабочего диапазона. Граничные условия описывали постоянство обратной линейной дисперсии и свободное прохождение рабочих пучков лучей в схеме. Свободными коррекционными параметрами полагались радиусы кривизны ВГДР и зеркала, координаты всех компонентов, а также параметры записи решетки. В табл. 1. приведены результаты расчета допусков на параметры ВГДР для данной схемы (выделены наиболее жесткие допуски, определяющие требования к точности изготовления).

Таблица 1

Допуски на параметры ВГДР для *S*-образного спектрографа

Параметр	$\lambda = 600$ нм	$\lambda = 200$ нм	$\lambda = 1000$ нм
	$\Delta Y' = 18,9$ мкм	$\Delta Y' = 10,2$ мкм	$\Delta Y' = 14,3$ мкм
Угловая коорд. 1-го источника	12,3'	7,2'	1,9'
Угловая коорд. 2-ого источника	29,1'	30,0'	8,1'
Линейная коорд. 1-го источника, мм	0,769	0,237	0,060
Линейная коорд. 2-го источника, мм	0,350	0,488	0,135
Радиус решетки R , мм	0,018	0,014	0,019

Из таблицы видно, что точность изготовления дифракционной решетки определяется преимущественно качеством изображения на длинноволновом краю спектра. При этом выполнить допуски на позиционирование первого точечного источника записи при имеющейся технологии оказывается крайне трудно. Увеличение длины плеч схемы записи решетки позволит увеличить абсолютные значения допусков на параметры схемы и привести их в соответ-

ствие с возможностями существующей технологии. Кроме того, увеличение габаритов значительно упростит сборку установки записи.

Для пересчета схемы записи пропорционально увеличиваем координаты источников излучения, вводим дополнительные граничные условия, задающие минимально возможные расстояния от источников записи до вершины решетки (≥ 200 мм), и проводим повторную численную оптимизацию оптической схемы. В результате оптимизации получаем новые значения радиусов кривизны решетки – 88,441 мм, и зеркала – 236,136 мм, а также координаты источников записи на длине волны 441,6 нм – (199,998 мм, $35^{\circ}37'33''$) и (209,376 мм, $24^{\circ}39'46''$). Взаимное расположение элементов в оптической схеме представлено на рис. 1 (1 – входная щель; 2 – ВГДР; 3 – вогнутое зеркало; 4 – плоскость фотоприемника).

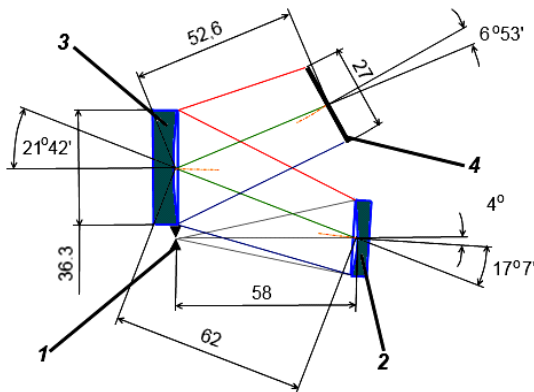


Рис. 1. Модернизированная оптическая схема спектрографа

Полученная оптическая схема по оптическим характеристикам качества изображения практически не отличается от исходной. В качестве демонстрации приведем на рис. 2 аппаратные функции (АФ) для оптимизированной и исходной схем (ширина входной щели 50 мкм, графики АФ для исходной схемы показаны пунктиром). В новой схеме линейный предел разрешения по уровню 0,5 на длинах волн 600, 200 и 1000 нм равен 51,2; 51,2 и 50 мкм, соответственно. Спектральное разрешение на тех же длинах волн составляет 1,52; 1,52 и 1,48 нм. Таким образом, по основному показателю качества изображения новая схема даже несколько превосходит исходную.

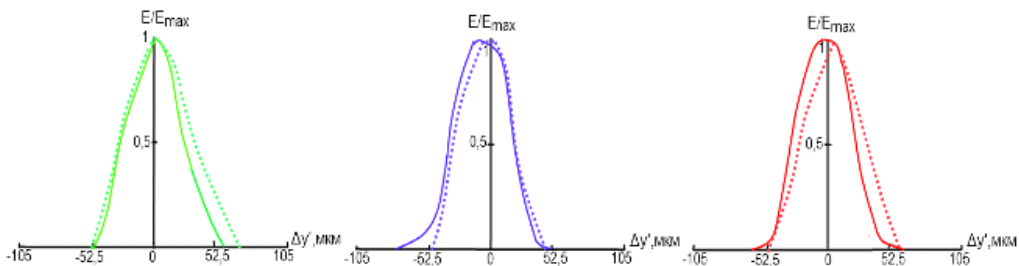


Рис. 2. Аппаратные функции спектрографов

Для полученной схемы проведем анализ допусков. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Допуски на параметры ВГДР в модернизированной схеме спектрографа

Параметр	$\lambda = 600$ нм $\Delta Y = 12,2$ мкм	$\lambda = 200$ нм $\Delta Y = 10,2$ мкм	$\lambda = 1000$ нм $\Delta Y = 14,3$ мкм
Угловая коорд. 1-го источника	3,3'	38,5'	13,6'
Угловая коорд. 2-ого источника	27,4'	33,3'	18,9'
Линейная коорд. 1-го источника, мм	0,100	1,280	0,413
Линейная коорд. 2-го источника, мм	0,286	0,963	0,417
Радиус решетки R, мм	0,014	0,020	0,031

Из табл. 2 видно, что допуски на линейные координаты источников стали почти в 2 раза более свободными и не превосходят технологического предела [2]. Допуски на угловые величины также увеличились более, чем в 2 раза и далеки от предела, определяемого измерительными средствами.

Таким образом, рассмотрено два варианта схемы записи вогнутой голограммной решетки для S-образного спектрографа. Показано, что увеличение расстояний до источников записи позволяет значительно снизить требования в точности сборки схемы записи при сохранении спектрального разрешения. При этом схема спектрографа отличается малыми габаритами и высокой светосилой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nazmееv M.M.* New generation spectrographs [Text] / M.M. Nazmееv and N.K. Pavlycheva // Opt. Eng. – 1994. – Vol. 33. № 8. – P. 2777-2782.
2. *Palmer C.* Diffraction grating handbook [Text] / C. Palmer and E. Loewen –Rochester: Newport Corp., 2005. – 271 p.

THE DEVELOPMENT OF SMALL-SIZE SPECTROGRAPH FOR THE TASKS OF ENVIRONMENTAL MONITORING

Akhmetgaleeva R.R., Muslimov E.R.

(Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan)

General requirements for a modern compact spectrograph for the tasks of environmental monitoring are high spectral resolution in wide spectral range and high illumination of the spectrum with minimum dimensions of the device. These requirements can be fulfilled by introducing of an additional projection spherical mirror in the optical scheme of flat field spectrograph [1], based on a concave holographic grating. Since in this case the direction of the rays is changed twice, we will refer to such a scheme as to «S-shaped» one. An example of small-sized S-shaped spectrograph scheme for the region of 200-1000 nm with moderate reciprocal linear dispersion of 31 nm/mm is considered. The design parameters of the scheme were obtained by means of numerical optimization in Zemax. The results of calculation of tolerances on the concave holographic grating parameters are presented. It's shown that tolerances on the grating recording parameters become too tight after introduction of the projection mirror. We proposed to include additional boundary conditions, which limit the minimal distances from the recording sources to the grating vertex. Than we re-optimized the optical scheme and analyzed the results. Instrument functions for the both of modified and original schemes for the entrance slit width equal to 50 microns are presented. Comparison of the instrument function demonstrates that changes in the grating recording scheme almost don't influence the spectrograph resolution. The spectral resolution in the both schemes is relatively high and reaches 1,48 nm. Tolerances on the grating recording parameters in this case are significantly wider and don't exceed 0,1 mm for linear coordinates and 3,3' for angular ones. These requirements match the abilities of the existing technology [2].

Thus, two options of the recording scheme for holographic grating used in S-shaped spectrograph were considered. It is shown that an increase of the distance to the recording sources allow significantly reduce the requirements to the recording scheme assemble accuracy while maintaining spectral resolution. Besides the spectrograph scheme is characterized by small dimensions and high aperture.

REFERENCES

1. *Nazmееv M.M.* New generation spectrographs [Text] / M.M. Nazmееv and N.K. Pavlycheva // Opt. Eng. – 1994. – Vol. 33. № 8. – P. 2777-2782.
2. *Palmer C.* Diffraction grating handbook [Text] / C. Palmer and E. Loewen –Rochester: Newport Corp., 2005. – 271 p.

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ ВКР ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

Газизов Д.И.,¹ Седов В.М.,¹ Лейченко Ю.А.²

(¹ ОАО «Швабе-технологическая лаборатория»;

² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Лазерная дальнометрия в настоящее время является активно развивающимся направлением оптико-электронного приборостроения, как военного, так и гражданского назначения. Основными требованиями к лазерным дальномерам, с учетом современных тенденций, являются:

- Безопасная для зрения человека длина волны излучения.
- Небольшие габариты, масса и энергопотребление дальномера.

Технические характеристики лазерного дальномера во многом зависят от применяемого в нём лазерного излучателя. В настоящее время в импульсных лазерных дальномерам активно используются лазеры с рабочей длиной волны 1,54 мкм.

В работе представлены результаты разработки и исследований импульсного лазера на основе кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата, активированного ионами неодима, и работающего в режиме вынужденного комбинационного рассеяния на длине волны 1,54 мкм. Данные излучатели компактны, работают в режиме пассивной модуляции добротности и имеют выходную энергию от 4 до 15 мДж.

Представленный лазерный излучатель «работает» на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния. При рассеянии излучения в спектре рассеянного излучения наблюдаются, кроме линий, характеризующих падающее излучение, еще добавочные линии или спутники, сопровождающие каждую из линий первичного спектра.

При этом:

- различие $\Delta\nu$ в частотах возбуждающей первичной линии ν_0 и линий каждого спутника, ν' , ν'' и так далее, характерно для рассеивающего вещества и равно частоте собственных колебаний молекул;

- спутники представляют собой две системы линий, которые симметричны по обе стороны возбуждающей линии: $\nu_0 - \nu_r = \nu_0 - \nu_0$, где ν_r частоты спутников, лежащие в стороне более длинных волн, чем возбуждающие, а ν_0 частоты спутников, лежащие в противоположной стороне.

Стимулированный аналог спонтанного комбинационного рассеяния, называется вынужденным комбинационным рассеянием. Данное явление так же заключается в поглощении фотона $\hbar\omega$ и испускании фотона $\hbar\omega_s$, но вероятность данного явления пропорциональна плотности потока, возбуждающего и рассеянного излучения. Благодаря рассматриваемому явлению, рассеянное излучение с частотой ω_s усиливается в рассеивающей среде по экспоненциальному закону, подобно усилению света в активной среде с инверсной заселенностью уровней в результате Эйнштейновского вынужденного испускания.

Вынужденное комбинационное рассеяние удобно характеризовать через коэффициент усиления α_s рассеянного света на единицу длины. Выразим коэффициент усиления через спектральную плотность спонтанного комбинационного рассеяния света:

$$\alpha_s = \frac{3}{4\pi} \frac{\lambda_s^2}{\Gamma} \frac{CI}{\omega_s},$$

где λ_s и Γ – длина волны и ширина линии комбинационного рассеяния.

Также с излучением начальной частоты должны появляться линии изменённой частоты. Частота рассеянного света комбинируется из частоты падающего света и частоты внутримолекулярных колебаний. Отсюда название – комбинационное рассеяние.

В спектре рассеянного света существуют линии, отличающиеся по частоте от падающего излучения на величины, соответствующие частотам внутримолекулярных колебаний. Увеличение интенсивности касается не всех, а наиболее интенсивных линий комбинационного рассеяния. Совместно с линиями первого порядка с частотами $\omega \pm \omega_i$, появляются так же линии более высоких порядков с частотами $\omega \pm 2\omega_i, \omega \pm 3\omega_i$. И в следствии этого рассеяние отчетливо выраженный направленный характер.

Комбинационное рассеяние, которое наблюдается при малых интенсивностях возбуждающего излучения, представляет собой спонтанное испускание фотона с энергией $\hbar\omega_s$, где $\omega_s = \omega - \omega_i$, при этом исчезает фотон $\hbar\omega$ возбуждающего излучения. Поток Φ_s спонтанного комбинационного рассеяния, отнесенный к единице объёма и суммированный по всем направлениям, пропорционален освещенности I вещества, создаваемой возбуждающим излучением $\Phi_s = CI$, где C – коэффициент пропорциональности, который характеризует рассеивающую способность вещества.

Активный элемент излучателя – кристалл калий-гадолиниевого вольфрамата, активированный ионами трёх валентного неодима, имеет диаметр 3 мм и длину 50 мм. Благодаря эффекту вынужденного комбинационного рассеяния, происходящему внутри активного элемента под действием излучения накачки, лазерный излучатель способен генерировать излучение на длине волны $\lambda = 1,54$ мкм. Вследствие того, что данный активный элемент работает по четырехуровневой схеме, пороговое значение энергии накачки достаточно мало – 3,5 Дж.

Источником накачки была выбрана импульсная лампа ИНП 2/35 с разрядным промежутком 35 мм. По техническим условиям максимальный разряд импульса накачки достигает значения 5 Дж, что вполне достаточно для генерации не только в нормальных климатических условиях, но и при температуре окружающей среды $+50^\circ \text{C}$.

Зеркалами резонатора выбраны – плоское зеркало, работающее в качестве выходного, и сферическое, работающее в качестве глухого. Применение такого резонатора обеспечивает энергетическую расходимость лазерного излучателя порядка 12 – 15 угловых минут по уровню 0,5 от общей энергии генерации. Кроме этого, как показали исследования, такой резонатор менее чувствителен к разъюстировкам. Пропускание плоского зеркала на длине волны $\lambda = 1,54$ равно 50%, а отражение сферического зеркала на этой же длине волны равно 99,7 %.

В качестве модулятора добротности выбран кристалл из алюмоиттриевого граната, активированного ванадием. Данный тип затвора является пассивным и не требует внешнего управления. В процессе конечной сборки и юстировки требуется лишь установить затвор в необходимое положение. Применение данного типа затвора позволило получить импульсы излучения длительностью 20 – 40 нс.

SMALL PULSE LASER WITH SRS FOR LASER RANGEFINDERS

Gazizov D.I.,¹ Sedov V.M.,¹ Leychenko Yu.A.²

(¹ OS «Shvabe - technological laboratory»;

² Kazan National Research Technical University)

This report presents the results of research and development engineering of small pulse laser with SRS for laser rangefinders.

The laser has the passive Q – modulator and following specifications:

- operating wavelength – 1,54 mkm;
- energy of the pulse – 4-15 mJ;
- divergence of radiation – 12'.

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ БОРТОВОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА С ЛАЗЕРНЫМ КАНАЛОМ

Бурдинов К.А., Смирнов А.Е.

(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), г. Казань)

Разработан макет системы амортизации (СА) бортового оптико-электронного прибора (БОЭП), включающий в себя три оптических канала: тепловизионный, телевизионный, лазерный. На рис. 1 представлен макет СА.



Рис. 1. Макет системы амортизации оптико-электронного прибора

Целью создания макета и его экспериментальных исследований являлось: исследование СА (снятие статических и динамических характеристик); исследование влияния вибраций на качество изображений; оценка влияния дисбаланса центра масс на колебания системы. Принципиальная схема оценки вибраций макета СА представлена на рис. 2.

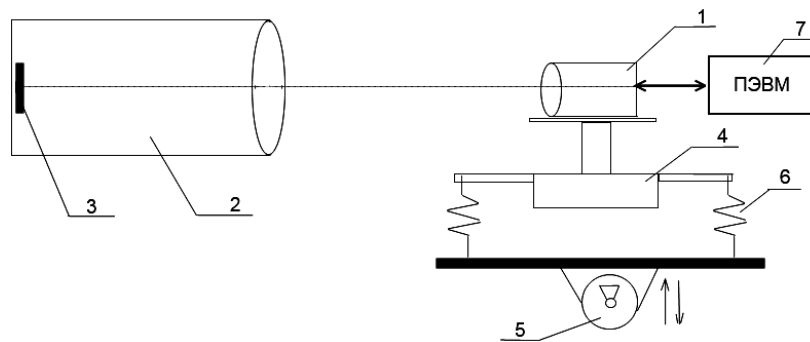


Рис. 2. Принципиальная схема оценки вибраций макета СА:

1 – камера; 2 – коллиматор; 3 – мира или тест объект; 4 – моментный двигатель; 5 – вибратор; 6 – амортизаторы; 7 – ПЭВМ для обработки сигнала с камеры

Макет СА конструктивно состоит из следующих элементов (рис. 3): основание с 4-мя регулировочными винтами-опорами – 1; пластина для крепления массовой нагрузки – 2; амортизаторы, соединяющие основание с пластиной (4 шт.) – 3; моментный двигатель (МД), закрепленный на пластине – 4; стакан для соединения камеры с ротором МД – 5; подставка под камеру – 6; камера с фото и видео съемкой – 7; пластина для крепления вибратора – 8; микро-

метр для снятия статических характеристик с ценой деления 0,01 мм – 9; уровни для выставки в горизонт – 10; шпильки с гайками для крепления МД (6 шт.) – 11; акселерометр, устанавливаемый внутри стакана – 12; вибратор – 13; балансировочный груз – 14.

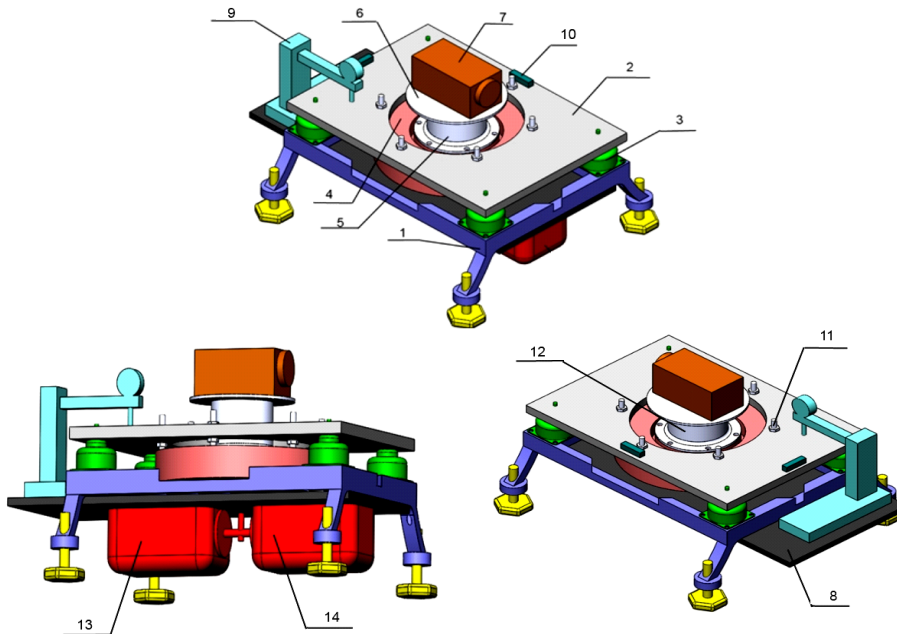


Рис. 3. Конструкция макета

В результате экспериментальных исследований макета СА были получены статические характеристики и резонансные частоты колебаний СА для трех вариантов амортизаторов: 7002LA; 7002РА, 7002LA+7002РА (рис. 4).

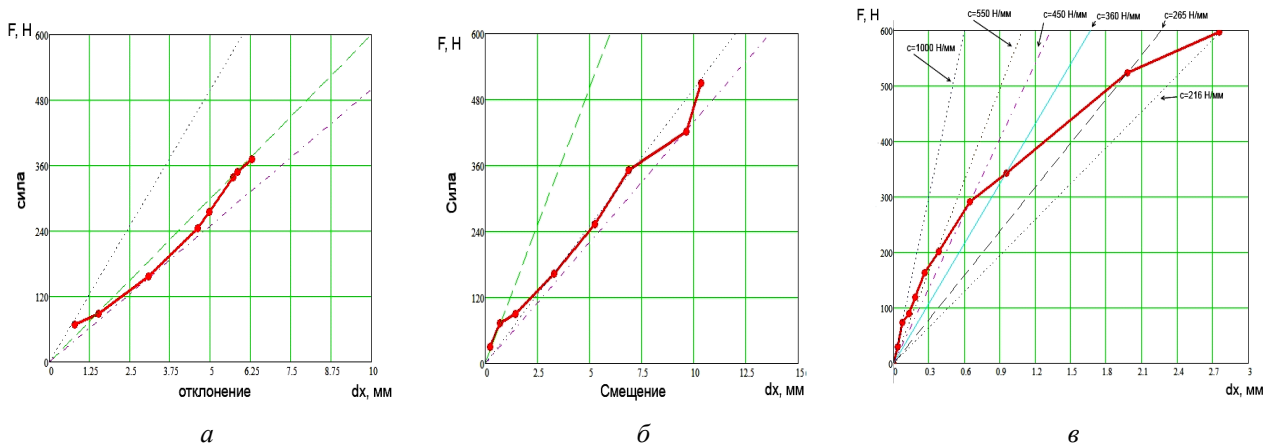


Рис. 4. Статические характеристики СА с амортизаторами: а – 7002LA; б – 7002LA+7002РА; в – 7002РА

Подбирая массу нагрузки (под различные варианты ОЭП) для выполнения фильтрации вибрационных колебаний в диапазоне (10-20000) Гц, необходимо выполнить условие[1,2]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \leq 10 \text{ Гц.}$$

Используя акселерометр и вибратор, предполагается получение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) макета СА. Для этого в конструкции предусмотрены крепления трехос-

ных акселерометров с выходом их сигналов на микроконтроллер, запись сигналов осуществляется в энергонезависимую память (SD карта) с частотой ≈ 150 Гц. Другим вариантом оценки динамических и статических характеристик является запись колебаний камеры с ПЗС матрицей (рис. 2), используя коллиматор и ПЭВМ для анализа записи. В конструкции макета также предусмотрено оценка колебаний используя лазер, зеркало, экран, в этом случае к подвижной пластине вместо камеры жестко крепится зеркало.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабаев А.А.* Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1984. – 232 с.
2. Вибрации в технике. Справочник: М. Маш. Т. 3. 1980. – 544 с.; т. 6. 1981. – 456 с.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL RESEARCH LAYOUT OF AMORTISATION SYSTEM OF BOARD OPTOELECTRONIC DEVICES WITH LASER CHANEL

Burdinov K.A., Smirnov A.E.

(Kazan National Research Technical University)

Abstrakt

Development of layout of amortization system of board optoelectronic devices and experimental research, it was made. We obtain the static and dynamic characteristics of the amortization system for three variants of the dampers.

Keywords: amortization system, static and dynamic characteristics, layout, accelerometer, frequency response function.

The layout has been created for the following purposes:

- layout research (static and dynamic characteristics);
- estimation of influence of vibration on image quality;
- estimation of influence of imbalance center of mass on the systems oscillation.

Layout structurally consists of the following elements: foundation; plate for fixing the target load; dampers connecting foundation with plate; torque motor fixed to plate; cup for fixing the camera to the rotor torque motor; stand for the camera; camera with photo and video; plate for fixing the vibrator; micrometer to get static characteristics; levels for exhibition in the horizon; mounts for torque motor; digital accelerometer with microcontroller; vibrator.

To obtain the frequency response of the layout amortization system, using the accelerometer and vibrator. In the construction provides the site of attachment of triaxial accelerometers. The output signal from the accelerometer goes to the microcontroller and stored in non-volatile memory (SD-card) with high frequency ($\gg 150$ Hz). Another option assess static and dynamic characteristics, it is analyzing of the recording vibrations using a CCD camera, collimator and PC.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарное заседание

<i>Белозёров А.Ф., Иванов В.П., Лукин А.В., Штырков Е.И.</i> Казанская голографическая школа	5
<i>Танин Л.В.</i> Научное, высокотехнологичное предприятие ЗАО «Голографическая индустрия» – пример государственного и частного партнерства в области создания на основе голографии защитных технологий документов, ценных бумаг и продукции в Республике Беларусь	9
<i>Раковец С.В.</i> Голограммные технологии в учебном процессе и научных исследованиях кафедры оптико-электронных систем КНИТУ-КАИ	26
<i>Моисеев С.А.</i> Квантовая память на основе фотонного эха: исследования и перспективы применения	29
<i>Venediktov V.Y.</i> Holographic wavefront sensors	31
<i>Скиданов Р.В., Морозов А.А., Хонина С.Н., Казанский Н.Л.</i> Дифракционные оптические элементы для изображающих систем	34
<i>Полещук А.Г., Корольков В.П., Бессмельцев В.П., Никоноров Ю.Н., Карван А.Л., Верхогляд А.Г.</i> Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро и нанообработки	38
<i>Лукин А.В., Балоев В.А., Ларионов Н.П., Мельников А.Н.</i> Осевые синтезированные голограммы – основа прецизионных лазерно-голографических методов и средств контроля для оптической технологии	43
<i>Толстик А.Л.</i> Динамическая голография и ее применение	46
<i>Кутанов А.А., Сыдык Н., Снимщиков И.А., Великасов С., Макаров В.П.</i> Спектральные интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния и прямая лазерная запись на них	50
<i>Корешев С.Н., Коретин И.Н.</i> Синтез голограмм-проекторов сфокусированного изображения для фотолитографии	53
<i>Грейсх Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А.</i> Дифракционная эффективность и качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой	63
<i>Дёмин В.В.</i> Цифровая голография биологических и других микрочастиц водных растворов – задачи и перспективы	68

С е к ц и я 1. Разработки и технологии в области защитных голограмм

<i>Яновский А.В., Кайтуков Ч.Б.</i> Новое направление в защитной голографии: комбинированные голограммы на основе аналогового изображения 3D объекта	75
<i>Смык А.Ф., Польщикова О.В., Смык А.Ф., Шурыгин А.В.</i> Расширение возможностей систем дот-матрикс для получения защитных голограмм	82

<i>Лушников Д.С., Маркин В.В., Жердев А.Ю., Одинокоев С.Б., Смирнов А.В.</i> Параметры качества многоцветных отражательных защитных голограмм с многоракурсными изображениями	85
<i>Жердев А.Ю., Загний Т.С., Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Цыганов И.К., Смирнов А.В., Безус Е.А.</i> Высокoапертурная голограммная линза для голографического принтера	87
<i>Ткаченко В.В., Борискевич А.А., Ероховец В.К.</i> Синтез цифровых фазовых голограмм Френеля	89
<i>Ткаченко В.В., Конойко А.И., Залесский В.Б., Пилипович В.А.</i> Голографический концентратор для солнечного элемента	92
<i>Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Заляпин Н.В.</i> Перспективы подавления спеклов с помощью электрооптической ячейки со смектическим сегнетоэлектрическим ЖК	94

С е к ц и я 2. Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

<i>Смородинов Д.С., Корешев С.Н., Никаноров О.В.</i> Синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях	105
<i>Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф.</i> Характеристики поверхностного рельефа случайных фазовых структур на материале ПФГ-01	113
<i>Вениаминов А.В., Захаров В.В., Ангервакс А.Е., Щеулин А.С., Рыскин А.И.</i> Объемная голограмма изнутри: лазерная сканирующая микроскопия голограмм в кристаллах фторида кальция с центрами окраски	116
<i>Павлычева Н.К.</i> Малогабаритные спектроанализаторы с голограммными дифракционными решетками	119
<i>Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Минаев В.Л.</i> Сдвиговая интерференционная микроскопия и микрофотография с излучением от точечного светодиода	123
<i>Белокопытов А.А., Лукин А.В., Максакова Л.А., Муслимов Э.Р., Саттаров Ф.А., Шигапова Н.М.</i> Светосильные вогнутые голограммные дифракционные решетки с плоским полем для малогабаритных спектрометров	127
<i>Шевцов М.К., Корешев С.Н.</i> Исследование опытных образцов голографического прицела по схеме ГОИ	130

С е к ц и я 3. Изобразительная 3D голография и фоточувствительные материалы для голографии

<i>Zacharovas S., Bakanas R., Stankauskas A.</i> Single-beam Denisyuk holograms recording with pulsed 30Hz RGB laser	133
<i>Алкис Лембессис, Шевцов М.К.</i> Светодиодные источники оптимального восстановления монохромных голограмм и оптоклонов	140
<i>Настас Андриан Михайлович, Иову М.С.</i> О выборе средней несущей частоты при голографической записи в фототермопластическом носителе на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников	142
<i>Андреева О.В., Манухин Б.Г., Кудрявцев П.В., Мосейко Д.А., Чивилихин С.А.</i> Тепловые эффекты при регистрации голограмм на образцах полимерного материала «Диффен»	147
<i>Деревянко Д.И., Миронников Н.Г., Шелковников В.В., Корольков В.П., Бережная В.Н., Орлова Н.А., Огнева Л.Н., Лоскутов В.А.</i> Исследование оптических методов формирования многоуровневого дифракционного микрорельефа на пленках гибридного фотополимерного материала «Гибример-42»	150

**С е к ц и я 4. Голограммные и дифракционные оптические элементы,
методы компьютерного синтеза, технология их изготовления и применение**

<i>Грейсх Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А.</i> Сравнительный анализ возможностей одновременного подавления спектральной и угловой зависимостей дифракционной эффективности рельефно-фазовых микроструктур	155
<i>Vorzobova N.D., Bulgakova V.G., Veselov V.O.</i> Holographic method of three-dimensional surfaces formation	160
<i>Белокопытов А.А., Лукина Т.А., Сидорова Т.Б., Шигапова Н.М.</i> Голограммные Notch-фильтры как эффективное средство защиты фотоприемных устройств оптико-электронных приборов от воздействия мощных лазерных пучков	162
<i>Ларионов Н.П., Агачев А.Р.</i> Голографическое устройство с повышенной точностью для контроля асферических поверхностей.....	165
<i>Лукин А.В., Мельников А.Н., Павлычева Н.К., Саттаров Ф.А., Шигапова Н.М.</i> Учебно-методический лабораторный комплекс по основам дифракционной оптики и голографии	168
<i>Полещук А.Г., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н.</i> Интерферометр Физо с дифракционными эталонными сферами для контроля асферической оптики	172
<i>Белокопытов А.А., Муслимов Э.Р., Скочилов А.Ф.</i> Голограммные дифракционные решетки в двойном монохроматоре.....	176
<i>Скиданов Р. В., Ганчевская С.В.</i> Дифракционные оптические элементы для регулируемого вращения микрообъектов	179
<i>Скиданов Р.В., Бланк В.А.</i> Изображающий спектрометр на основе дифракционной линзы ...	183
<i>Черных В.Т., Черных Г.С.</i> Способ повышения чувствительности метода голографической интерферометрии на основе многократной дифракции световых пучков.....	187
<i>Белозеров А.Ф., Черных В.Т., Черных Д.А.</i> Голографические устройства для изучения быстропротекающих процессов в энергоустановках	190

**С е к ц и я 5. Голограммные и дифракционные оптические элементы,
методы компьютерного синтеза, технология их изготовления и применение**

<i>Шаульский Д.В., Стариков Р.С., Злоказов Е.Ю., Евтихийев Н.Н., Петрова Е.К., Молодцов Д.Ю.</i> Инвариантные фильтры с минимумом шума и энергии корреляции: возможности реализации с применением современных пространственно-временных модуляторов света	195
<i>Донченко С.С., Бетин А.Ю., Бобринёв В.И., Одинокоев С.Б., Злоказов Е.Ю., Стариков Р.С.</i> Экспериментальные исследования параметров одномерных микроголограмм Фурье для голографической системы памяти	201
<i>Павлов А.В., Кочетков П.В.</i> Порождение понятий наложенными голограммами	203
<i>Морозов О.Г.</i> Фотонная система диаграммообразования с голограммными элементами для фазированных антенных решеток	207
<i>Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М.</i> Голографические исследования колебаний прямоугольных пластин применительно к лопаткам авиационных ГТД.....	214
<i>Дёмин В.В., Половцев И.Г., Ольшукоев А.С., Каменев Д.В.</i> Макет погружаемого цифрового голографического модуля для исследования планктона и других частиц в воде	217
<i>Дёмин В.В., Каменев Д.В.</i> Алгоритм автоматического расчёта концентрации частиц в объёме и их распределения по размеру на основе голографических данных.....	220
<i>Шандаров С.М., Буримов Н.И., Быков В.И., Шепелевич В.В.</i> Применение адаптивной голографической интерферометрии для определения параметров фоторефрактивных кристаллов	224

<i>Каленков Г.С., Каленков С.Г., Штанько А.Е.</i> Гиперспектральная Фурье-голография микрообъектов	228
<i>Макаревич А.В., Шепелевич В.В., Ропот П.И., Шандаров С.М.</i> Экспериментальная зависимость дифракционной эффективности голограмм в Bi12SiO20 от толщины образцов, применяемых в интерферометрии	237
<i>Лукин А.В.</i> Лазерно-голографические методы контроля больших отступлений волновых поверхностей от заданной формы	241

Стендовые доклады

Секция 1

<i>Горчарук А.И., Моисеенко П.В., Танин Л.В., Бобореко А.Г.</i> Механическое формирование голографических защитных элементов методом рекомбинации	245
<i>Мустафин М.К.</i> Получение защитных аналоговых голограмм по замкнутому циклу	247
<i>Колючкин В.В., Злоказов Е.Ю., Одинокоев С.Б., Талалаев В.Е., Цыганов И.К.</i> Метод определения глубины поверхностного микрорельефа защитных голограмм с помощью когерентно-оптической системы	248
<i>Бабкин О.Э., Жданова А.В., Михайлов В.Н.</i> Разработка УФ-клея для холодного тиснения фольгой	251
<i>Герасимова Ю.В., Ильина В.В., Михайлов В.Н.</i> Измерение усадки регистрирующих материалов при записи голограмм	254

Секция 2

<i>Иштимиров Д.Б., Комоцкий В.А., Суетин Н.В.</i> Управление мощностью ИК излучения (10,6 мкм) с применением отражательной дифракционной решётки	257
<i>Пряхин Ю.А., Яковлев Е.В.</i> Объемные дифракционные решетки как диспергирующие и фильтрующие элементы спектральных приборов	260
<i>Сагателян Г.Р., Одинокоев С.Б., Попов В.В.</i> Разработка и изготовление комбинированных голограммных и дифракционных оптических элементов	264
<i>Злоказов Е.Ю., Стариков С.Н., Одинокоев С.Б., Бетин А.Ю., Бобринёв В.И., Ковалёв М.С., Соломашенко А.Б.</i> Устройство визуализации центрально-симметричной знако-символьной информации на основе компьютерно-синтезированных голограмм Фурье	269

Секция 3

<i>Лантух Ю.Д., Летута С.Н., Пашкевич С.Н., Алиджанов Э.К.</i> Суперлюминесценция органических красителей в биополимерных матрицах при записи голограмм	273
<i>Дрейден Г.В., Андреева О.В., Семенова И.В.</i> Ежегодный конкурс на присуждение премии имени Ю.И. Островского за лучшие научные работы в области оптической голографии и интерферометрии	277
<i>Андреева О.В., Беспалов В.Г., Козлов С.А.</i> Чтения памяти Ю.Н.Денисюка в Университете ИТМО	280
<i>Малов А.Н., Неупокоева А.В.</i> Управление светочувствительными свойствами самопроявляющихся регистрирующих сред на основе дихромированного желатина	281

Секция 4

<i>Ленкова Г.А.</i> Особенности измерения оптической силы би-фокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза МИОЛ-Аккорд	286
---	-----

<i>Апрелев Ю.И., Миндубаев А.Р.</i> Демонстрационные возможности учебного набора голограммных оптических элементов для студентов оптических направлений подготовки...	290
<i>Коренной К.С., Белокопытов А.А., Максакова Л.А.</i> Оценка эксплуатационных характеристик точечных диафрагм для пространственной фильтрации мощного лазерного излучения по дифракционной картине	291
<i>Лукин А.В., Белокопытов А.А., Максакова Л.А., Сидорова Т.Б., Саттаров Ф.А., Скочиллов А.Ф., Тугаринов С.Н., Шигапова Н.М.</i> Крупногабаритные голограммные объемно-фазовые дифракционные решетки для спектральной аппаратуры высокого разрешения	295
<i>Белокопытов А.А.</i> Запись вогнутых голограммных дифракционных решеток негомоцентрическими пучками	298
<i>Балоев В.А., Знаменский М.Ю., Лукашевич Я.К., Саттаров Ф.А.</i> Решетки-поляризаторы на основе голограммных дифракционных решеток	301
<i>Гаранина Ю.В.</i> Автоматизация расчета нарезного аналога вогнутой голограммной дифракционной решетки с коррекцией аберраций	303
<i>Ахметшина И.И., Бикбаев М.Ш.</i> Автоматизация расчета технологических параметров изготовления синтезированных голограмм со ступенчатым профилем	307
<i>Муслимов Э.Р., Ахметов М.М., Лукин А.В., Мельников А.Н.</i> Двухканальный спектрометр для УВИ-диапазона	311
<i>Любимов А.И., Романов В.В.</i> Оптимизация характеристик сжатого лазерного импульса в компрессоре на дифракционных решетках	315
<i>Полещук А.Г., Седухин А.Г.</i> Оптимизация параметров высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива	319
<i>Скочиллов А.Ф., Белокопытов А.А.</i> Дифракционные решетки для оптико-электронного прибора перспективной международной космической обсерватории, обеспечивающие режим бесщелевой спектроскопии в УФ-диапазоне спектра	322
<i>Ручкина М.А., Жердев А.Ю., Одинокоев С.Б.</i> Исследование спектрально-угловых характеристик плазмонных двумерных дифракционных решеток	325

С е к ц и я 5

<i>Сафина Д.М., Царева А.М., Гайфуллин Б.Р., Макаева Р.Х.</i> Экспериментальные исследования свойств голограмм	330
<i>Гаранин А.И., Конин Ю.А., Перминов А.В.</i> Контроль качеств оптических волокон и заготовок методом цифровой голографической интерферометрии	333
<i>Черных В.Т., Черных Д.А.</i> Лазерный интерферометр	334
<i>Черных В.Т., Борисов А.Н.</i> Светодиоды – миниатюрные источники света для восстановления волновых фронтов с голограмм	337
<i>Черных В.Т., Нуруллин Р.Г.</i> Лазерные терапевтические устройства	340
<i>Борисов А.Н., Черных В.Т., Арбузов В.А.</i> Разработка и исследование интерференционного фильтра для когерентных оптических систем	344
<i>Борисов А.Н., Черных В.Т.</i> Голографическое устройство для контроля толщины пленок в процессе их формирования	347
<i>Борисов А.Н., Никитин А.С.</i> Разработка фазоуправляемых интерференционных тонкопленочных элементов для когерентных оптических систем	349
<i>Черных В.Т., Черных Д.А.</i> Разработка лазерного устройства для розжига топочной горелки топки котла	352
<i>Жужукин А.И.</i> Применение спекл-интерферометрии в задачах экспериментальной доводки деталей газотурбинных двигателей	354

С е к ц и я 6

<i>Бурдинов К.А., Смирнов А.Е., Карпов А.И.</i> Разработка конструкции управляемого подвеса лазерного канала следящего оптико-электронного прибора в SOLIDWORKS	358
<i>Кренев В.А., Молин Д.А., Карпов А.И.</i> Динамика бортовой лазерной локационной системы слежения	361
<i>Муслимов Э.Р., Насыров А.Р., Скочилор А.Ф.</i> Дифракционные решетки в составе базового модуля гиперспектрометра с высоким пространственным разрешением ближнего ИК-диапазона	366
<i>Белокопытов А.А., Скочилор А.Ф., Чугунов Ю.П.</i> Нарезные дифракционные решетки для изображающих спектрометров в конфигурации Оффнера	369
<i>Гуськов И.А.</i> Варианты комплексирования каналов спектрометра с пропускающим голограммных оптическим элементом	371
<i>Бурмистров В.А.</i> Двухдиапазонный спектрограф с голограммной дифракционной решеткой	375
<i>Гильфанов А.Р., Бакшаев М.А., Петрановский Н.А.</i> Исследование полосы поглощения Notch-фильтра	379
<i>Ахметгалеева Р.Р., Муслимов Э.Р.</i> Разработка малогабаритного спектрографа для задач экологического мониторинга	382
<i>Газизов Д.И., Седов В.М., Лейченко Ю.А.</i> Малогабаритный импульсный лазер на основе ВКР преобразования для лазерной дальнометрии	385
<i>Бурдинов К.А., Смирнов А.Е.</i> Разработка и экспериментальное исследование макета системы амортизации бортового оптико-электронного прибора с лазерным каналом	387

ГОЛОГРАФИЯ. НАУКА И ПРАКТИКА

12-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ГОЛОЭКСПО-2015»

12 – 15 октября 2015 г.
г. Казань, Россия

СБОРНИК ТРУДОВ

HOLOGRAPHY. SCIENCE AND PRACTICE

PROCEEDINGS OF THE 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE
“HOLOEXPO’2015”

12-15 October 2015
Kazan, Russia

*Статьи воспроизводятся с оригиналов, представленных авторами,
и Издатель не несет ответственности за содержание статей.*

Ответственный за выпуск В.Н. Милёхин
Компьютерная верстка: А.А. Золина, Н.Н. Семёнова

Подписано в печать 20.09.15.
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 46,0.
Тираж 150. Заказ Д 63.

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10

Спонсоры конференции

