

Экспериментальное исследование процесса глубокого травления кварца при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов

С. А. Фомченков

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН, Самара, Россия

В работе проведены и представлены результаты экспериментального исследования по жидкостному и плазмохимическому травлению кварца на глубину сопоставимую с характерным периодом структуры микрорельефа. Исследованы способы формирования стойких к травлению масок на поверхности подложки. На основе результатов экспериментов подобраны и оптимизированы параметры процесса травления.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, жидкостное травление, изготовление ДОЭ и ГОЭ.

Цитирование: Фомченков, С. А. Экспериментальное исследование процесса глубокого травления кварца при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов / С. А. Фомченков // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 173–177.

Введение

Микрорельеф рабочей поверхности дифракционных оптических элементов (ДОЭ), а также более сложных голограммных оптических элементов (ГОЭ) — традиционно создаются локализованным микровытравливанием неорганического оптического стекла через защитную химически стойкую маску [1]. В качестве наиболее эффективного способа создания функционального микрорельефа фазовых ДОЭ-ГОЭ в настоящее время рассматривается реактивное ионно-плазменное (плазмохимическое) травление (ПХТ) [2].

Поверхность подложки будущего ДОЭ или ГОЭ должна обеспечивать высокую адгезию, наносимых пленок, используемых в качестве маскирующих слоев и сохранять высокую степень химической и физической чистоты поверхности [3].

1. Способы формирования масок для травления кварца

В качестве маскирующих слоев (контактная маска) могут быть использованы как слои светочувствительных материалов (фоторезисты и т. п.), так и тонкие пленки металлов. Основные требования, предъявляемые к материалам контактных масок — высокая стойкость в плазме рабочих газов при незначительной толщине самой маски.

Слой фоторезиста позволяет легко сформировать будущую маску на поверхности подложки, но при этом обладает плохой стойкостью к внешнему воздействию, а именно быстро деградирует при жидкостном и плазмохимическом травлении, что плохо влияет на качество и форму формируемого микрорельефа в поверхности подложки.



Рис. 1. Внешний вид установки магнетронного напыления Каролина Д12А

Слой хрома используется в качестве маскирующего слоя при высокоселективном травлении кварца на необходимую глубину, поскольку селективность травления кварца относительно фоторезиста является крайне низкой.

Напыление хрома производилось на установке магнетронного распыления Каролина Д12А (Россия, Зеленоград). Данная установка предназначена для нанесения тонких пленок различных материалов в вакууме магнетронным способом. Внешний вид установки представлен на рис. 1.

Толщина напыляемого слоя хрома определялась исходя из необходимой глубины травления кварца. Помимо хорошей адгезии пленки к материалу подложки, осуществлялся нагрев подложек до 200 °С. Толщина получаемых слоев в процессе напыления контролировалась с помощью кварцевого измерителя толщины, окончательная (на извлеченной из установки подложке), на профилометре KLA Tencor P-16+.

2. Формирование топологии оптического элемента

Для формирования топологии будущих оптических элементов был выбран способ прямого лазерного взаимодействия с пленкой хрома, в результате которого в пленке хрома формируется оксид хрома позволяющий производить дальнейшие манипуляции селективно для засвеченных и не засвеченных участков пленки.

Структуры в пленках хрома формировались на станции лазерной записи (СЛЗ) CLWS200 (Россия, Новосибирск) в режиме непрерывного кругового сканирования под управлением ЭВМ. Внешний вид установки представлен на рис. 2.

Лазер ($\lambda = 532$ нм) генерирует непрерывное излучение, которое проходя через систему поворотных зеркал и модуляторов, попадает в оптическую систему и головку записи, откуда

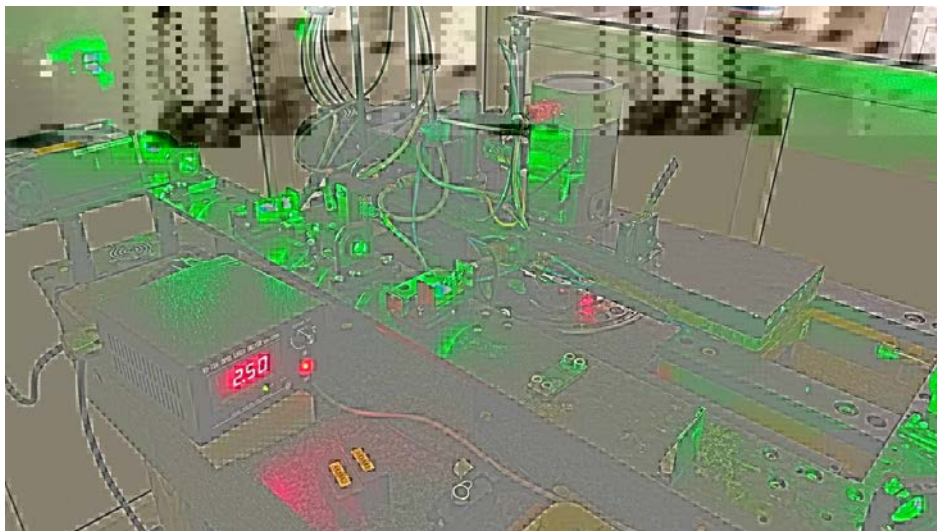


Рис. 2. Внешний вид станции лазерной записи CLWS200

фокусируется на образец, прикреплённый к вращающемуся столу вакуумным зажимом. Во время записи образец вращается относительно сфокусированного пучка света, который медленно перемещается в радиальном направлении. Оптическая система фокусирует излучение лазера в записывающее пятно с диаметром порядка 0,8 мкм.

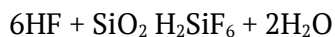
На участках, которые были подвержены сфокусированному лазерному излучению, формируется оксид хрома, который используется далее, как маска при травлении.

3. Жидкостное травление

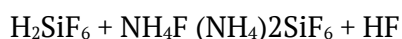
Далее для создания фазовой решетки из амплитудной необходимо передать рельеф в структуру кварцевой подложки через сформированную маску из хрома. Для решения данной задачи можно использовать жидкостное травление.

При жидкостном травлении оксидов происходят реакции замещения (кислотно-основные). В процессе реакции травления элементарный фтор может легко замещать атом O в SiO₂, так как фтор обладает меньшим ионным радиусом (0,14 нм), чем SiO (16 нм). Энергия связи SiF в 1,5 раза превышает энергию связи SiO. Химия травления SiO₂ включает нуклеофильное воздействие фторидных групп на связи SiO.

Окончательно реакция травления может быть представлена как



Обнаружено, что при добавлении NH₄F к буферному раствору HF скорость травления увеличивается благодаря образованию HF₂⁻. При этом накопление H₂SiF₆ конкурирует с процессом образования осадка (NH₄)₂SiF₆.



По результатам проведенных экспериментов удалось добиться скорость травления кварца порядка 120 нм/мин. При этом стоит отметить высокую стойкость маски оксида хрома и хрома в данной растворе, что позволяет травить фазовые элементы на существенные глубины.



Рис. 3. Внешний вид установки магнетронного напыления Каролина PE15

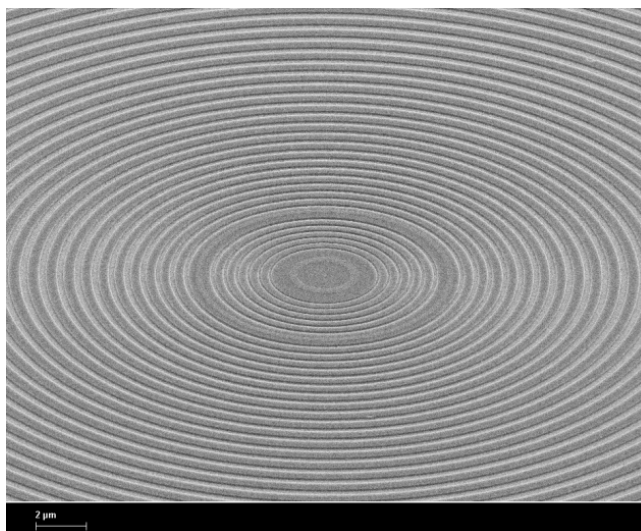


Рис. 4. Внешний вид изготовленного аксикона с помощью ПХТ через маску оксида хрома, полученную на СЛЗ

4. Плазмохимическое травление

Для решения задачи передачи рельефа в структуру кварцевой подложки через сформированную маску хрома наиболее удачно использовать плазмохимическое травление (ПХТ). Эксперименты проводились на установке ПХТ Каролина PE15 (Россия, Зеленоград). Внешний вид установки представлен на рис. 3.

Скорость травления хрома в плазме SF₆ составила 0,04 нм/с, а кварца 1,5 нм/с. Благодаря разности в скоростях травления маски и подложки получение микрорельефа с глубиной травления 1,5 мкм не представляет труда. Причем благодаря контролируемости и повторяемости процессов травления при использовании тестовых дифракционных структур глубина травления выдерживалась с высокой точностью.

У металлической маски не наблюдалось деградации с краев, травление было равномерным по всей площади, поэтому профиль рельефа сохраняется близким к расчетному значению. Оптимальные параметры процесса травления кварца в среде SF₆. Предварительная откачка рабочей камеры установки — не хуже $1,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Установившееся рабочее давление SF₆ в камере $1,5 \cdot 10^{-1}$ Па (при работающих средствах откачки). Установившийся расход рабочего газа $Q = 1,5$ л/ч. Время прокачки газа перед включением ВЧ разряда — около 5 мин. Ток электромагнита — 2,0 А. ВЧ-мощность ≈ 450 Вт. Скорость травления кварца в данном режиме — порядка 1,5 нм/с. Внешний вид аксикона изготовленного по предложенному технологическому процессу представлен на рис. 4.

Заключение

Экспериментально подобранный технологический процесс производства ДОЭ и ГОЭ, позволяет производить травление и передачу рельефа через маски оксида хрома в кварцевые подложки на глубину сопоставимую с характерным периодом структуры. Полученные данные

можно использовать для производства элементов оптики спектральных приборов для спутников дистанционного зондирования Земли.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, а также гранта РФФИ 18-58-14001 АНФ_а.

Список источников

- [1] **Одинокоев, С. Б.** Экспериментальные исследования процесса плазмохимического травления стекла при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов / С. Б. Одинокоев, Г. Р. Сагатеян, А. С. Гончаров, М. С. Ковалев, А. Б. Соломашенко, Н. М. Вереникина // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2012. — № 5. — С. 391–410.
- [2] **Одинокоев, С. Б.** Экспериментальные исследования процесса плазмохимического травления стекла при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов / С. Б. Одинокоев, Г. Р. Сагатеян // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2010. — № 2. — С. 92–104.
- [3] **Сойфер, В. А.** Введение в дифракционную микрооптику / В. А. Сойфер. — Самара, 1996. — 94 с.
- [4] **Сойфер, В. А.** Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники / В. А. Сойфер, В. В. Котляр, Л. Л. Досколович // Компьютерная оптика. — 2009. — Том 33. — № 4. — С. 352–368.