

## 10. Современные методы повышения разрешения термохимической лазерной записи дифракционных структур

**А. Г. Полещук<sup>1</sup>, В. П. Корольков<sup>1</sup>, А. Г. Седухин<sup>1</sup>, В. П. Вейко<sup>1,2</sup>, А. А. Кутанов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной академии наук Киргизской Республики, Бишкек, Киргизская Республика

Рассмотрены различные методы, эффекты и факторы повышения пространственного разрешения безрезистной лазерной записи дифракционных структур на пленках металлов и полупроводников, основанные на тепловом воздействии сфокусированного лазерного излучения.

**Ключевые слова:** Безрезистная лазерная запись, Термохимический метод лазерной записи, Дифракционные оптические элементы, Лазерные технологии.

**Цитирование:** Полещук, А. Г. Современные методы повышения разрешения термохимической лазерной записи дифракционных структур / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, А. Г. Седухин, В. П. Вейко, А. А. Кутанов // НОЛОЕХРО 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 39—42.

### Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) часто изготавливаются с использованием литографических методов, разработанных для микроэлектроники. Топология ДОЭ экспонируется лазерным пучком на тонкой фоторезистной пленке, нанесенной на пленку хрома, напыленную на стеклянную подложку. После проявления фоторезиста изображение из фоторезиста переносится на маскирующую пленку хрома путем травления в селективном травителе. Пленку хрома можно использовать непосредственно как бинарную амплитудную голограмму или в качестве маски для фотолитографического контактного или проекционного копирования. Через эту маску также можно протравить материал подложки в жидком селективном травителе или с помощью реактивного ионного травления. Эти методы работают достаточно хорошо в полупроводниковой промышленности на плоских пластинах толщиной от долей мм до нескольких мм, с поперечным размером 100—200 мм. Однако ряд специальных ДОЭ требуется изготавливать на толстых высококачественных подложках, которые очень неудобны для покрытия однородным тонким слоем фоторезиста из-за большого веса. Другое ограничение применения фоторезиста связано с круговыми лазерными записывающими системами, которые имеют преимущества при изготовлении ДОЭ [1]. Из-за линейной зависимости требуемой дозы экспозиции от скорости сканирования, увеличивающейся с радиусом записи, необходимо изменять мощность пучка пропорционально радиальной координате записывающего пучка в очень широком динамическом диапазоне (порядка 1:100 000), что технически сложно. Описанных трудностей можно избежать, используя безрезистные лазерные технологии прямой записи на пленках металлов или полупроводников. Все эти технологии основаны на тепловом воздействии лазерного пучка на маскирующий слой, которое позволяет использовать нелинейный характер зависимости

изменяемого параметра (либо коэффициента пропускания, либо толщины оксида) от температуры для повышения пространственного разрешения лазерной записи.

В настоящей работе указанное повышение пространственного разрешения является основной целью, для достижения которой здесь обсуждаются особенности физических и термохимических процессов модификации структуры тонких металлических и кремниевых пленок (до начала плавления и абляции) при воздействии на них сфокусированного лазерного пучка либо пучка, полученного в результате многолучевой оптической интерференции мощного лазерного излучения. Кроме того, с той же целью и применительно к прямой (поточечной) записи, одновременно обсуждаются вопросы практического выбора параметров исходных пленок и потенциальные варианты уменьшения диаметра сфокусированного лазерного пучка.

### Термоструктурная лазерная запись на пленках аморфного кремния

Экспериментальные исследования термоструктурной сканирующей лазерной записи на пленках негидрогенизированного аморфного кремния (a-Si) продемонстрировали возможность записи низкоконтрастных бинарных и многоуровневых фотошаблонов. Принцип записи микроизображения на этом материале основан на уменьшении поглощения пленки при переходе от аморфного состояния к поликристаллическому под действием нагрева лазерным пучком [1]. Эксперименты проводились на пленках a-Si толщиной 50—200 нм, напыленных различными методами. Показано, что значительное уменьшение коэффициента пропускания наблюдается для пленок всех типов. Для пленок толщиной 100—110 нм под действием лазерного излучения коэффициент пропускания изменяется от 0,5—2 % до 10—20 % в зависимости от способа нанесения. При этом пленка не плавится и не испаря-

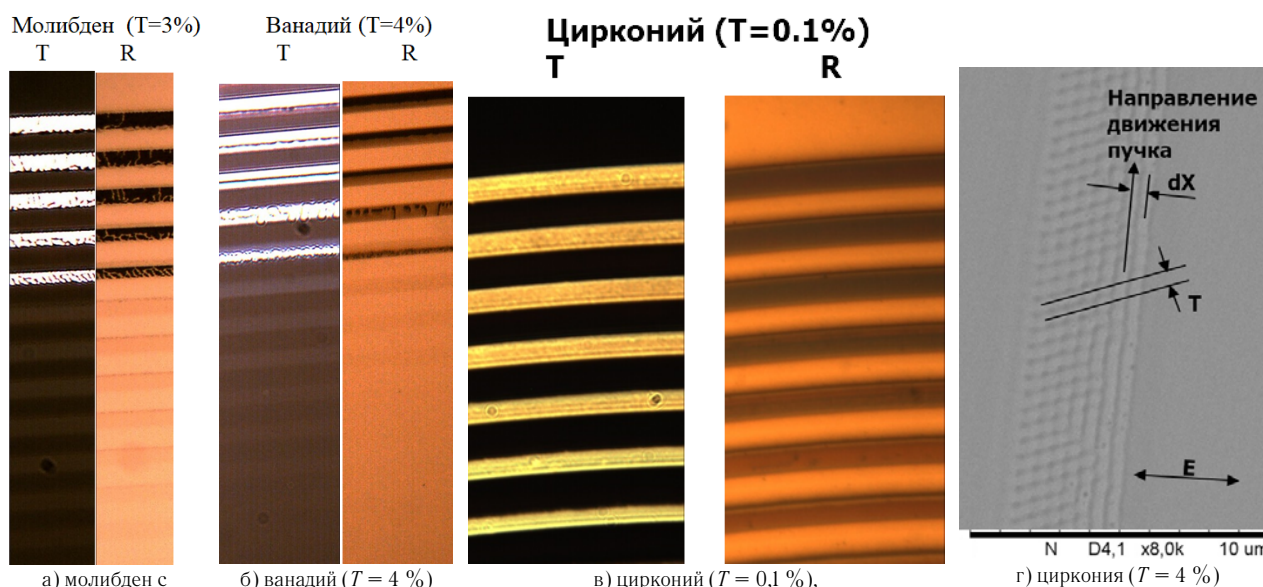
ется. Прямая лазерная запись на пленках a-Si отличается высоким пространственным разрешением за счет эффекта остановки теплового расплывания записываемого трека после просветления центральной зоны, которое ведет к существенной потере энергии в максимуме гауссова распределения интенсивности. При диаметре записывающего пучка 0,7 мкм (FWHM) достигается ширина линий порядка 0,3 мкм до скоростей в диапазоне 0,1–1 м/с.

#### Термохимическая лазерная запись на пленках металлов

Термохимическое воздействие лазерного излучения на пленки различных металлов достаточно давно исследуется в приложении к записи микроизображений. Лазерно-индуцированное окисление тонких пленок хрома с последующим селективным травлением используется на практике для изготовления дифракционных оптических элементов и фотошаблонов общего назначения. Базовая идея метода впервые была предложена в ИТМО (г. Санкт-Петербург) [2] и затем развита до уровня реальной технологии в варианте сканирующей записи сфокусированным пучком в ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск) [3]. Применительно к видимому диапазону длин волн, таким путем успешно изготавливаются амплитудные дифракционные оптические элементы с минимальной шириной хромовых линий маски до 0,5 мкм на пленках толщиной 50–80 нм. С потерей разрешения толщина пленок может быть доведена до 200 нм, но существенно повышается вероятность растрескивания пленок при лазерном нагреве из-за напряжений в напыленной толстой пленке. Для дальнейшего повышения разрешения необходимо уменьшать толщину пленок хрома, но при этом падает оптическая плотность сформированных структур, что тре-

бует более тщательного подбора параметров при фотолитографическом копировании топологии фотошаблона. Кроме данного процесса, можно использовать слой выращенного под лазерным нагревом оксида как маску для реактивного ионного травления необлученного металла и далее материала подложки.

Для повышения разрешения термохимической записи на металлических пленках можно использовать эффект снижения поглощения пленки в максимуме интенсивности лазерного пучка после просветления пленки, подобно записи на пленках аморфного кремния. В данном случае снижать поглощение можно за счет сквозного прожигания (абляции) пленки [4], либо за счет неструктурного режима сквозного окисления [5]. Сквозное окисление позволяет получить существенно меньшую дефектность, но необходимо провести исследования по выбору металла, который обеспечит сквозное окисление за наименьшее время. На рис. 1а–1в показаны микрофотографии тестовых решеток с радиальным периодом 10 мкм, записанных на пленках различных металлов лазерным пучком с длиной волны 532 нм сфокусированным до диаметра 0,7 мкм при линейной скорости кругового сканирования 113 мм/с. Пленки циркония оказались наиболее перспективными для записи сквозных оксидных структур даже для толщин, при которых пропускание равно 0,1 %. При оптической плотности меньше 2D на пленках циркония образуются при записи лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС), пример которых показан на рис. 1г. Период ЛИППС  $T$  примерно равен межстрочному интервалу сканирования  $dX$ . Направление поляризации лазерного пучка в эксперименте было перпендикулярно направлению его движения. Образование ЛИППС, по-видимому, связано с возникновением положитель-



а) молибден с пропусканием  $T = 3 \%$

б) ванадий ( $T = 4 \%$ )

в) цирконий ( $T = 0,1 \%$ ),

г) циркония ( $T = 4 \%$ )

Рис. 1. Микрофотографии тестовых решеток на пропускание (Т) и отражение (R) для различных пленок

ной обратной связи, определяемой комбинацией факторов: поглощением излучения пленкой, температурой пленки и скоростью сканирования. В общих чертах, механизм можно описать следующим образом. При нагреве металлической пленке лазерным пучком фронт окисления идет вглубь к подложке. Когда пленка окисляется насквозь, значительная часть энергии пучка уходит в подложку. В результате температура падает, и распространение фронта окисления останавливается. Непрерывно сканируемый пучок выходит из зоны сквозного окисления и снова начинает поглощаться и разогревать пленку, и через некоторое время фронт окисления снова доходит до подложки. Таким образом, возникает волнообразный процесс колебания поглощения и температуры. Увеличение толщины пленки повышает тепловую инерционность системы и ЛИППС не образуются. Однако такой подход существенно ограничивает максимальную скорость, при которой достигим режим сквозного сканирования.

#### Методы уменьшения диаметра сфокусированного лазерного пятна

К настоящему времени в мировой практике накоплен большой практический опыт по острой фокусировке лазерных пучков до малых и сверхмалых размеров в различных оптических средах и в разных диапазонах длин волн. Однако, из всего многообразия различных оптических систем и методов, пригодных для решения этой задачи, наиболее практичными и удобными для скоростной сканирующей лазерной записи (с линейной скоростью записи, потенциально, до 10 м/с) представляются системы и методы, которые могут обеспечить относительно большой рабочий отрезок (не менее чем 0,2 мм) между подложкой с регистрирующим материалом и самой фокусирующей системой. Отсюда следует, что ближнепольные фокусирующие системы, использующие для записи неоднородные затухающие лазерные волны и имеющие неприемлемо малые рабочие отрезки (менее 1 мкм для лазеров видимого и УФ длин волн) являются, фактически, непригодными. Далее будут рассматриваться только системы с дальней (дистанционной) фокусировкой однородных лазерных волн и большими рабочими отрезками (типа стандартных биологических объективов, их модификаций и новых видов систем).

Как известно, при использовании хорошо скорректированного (исправленного на аберрации) стандартного апланатического объектива и его однородном освещении, минимально возможный диаметр сфокусированного лазерного пятна можно оценить, в скалярном приближении, как  $0,51\lambda_w/NA$  (дифракционный предел Аббе, по уровню половинной интенсивности), где  $\lambda_w = \lambda/n$  — рабочая длина волны в среде фокусировки,  $n$  — показатель преломления среды фокусировки, а  $NA$  — числовая апертура фокусирующей системы. Отсюда следует, хорошо известное и жесткое правило, по которому общей мерой уменьшения раз-

мера сфокусированного лазерного пятна при рассматриваемой дальнепольной фокусировке является уменьшение рабочей длины волны лазерного источника и повышение числовой апертуры  $NA$  фокусирующей системы. Соответственно, важным фактором уменьшения размера пятна является также повышение показателя преломления среды записи. Три других дополнительных и независимых меры, способных обеспечить работу на сверхразрешении (с преодолением предела Аббе) — это использование кольцевой формы апертуры фокусирующей системы (или, иначе, фокусируемых пучков с кольцевой формой), специальных неоднородных видов поляризации фокусируемого лазерного пучка (типа радиальной и азимутальной), а также оптимальной пространственно-частотной фильтрации компонентов фокусируемой волны (фильтрации Торальдо с использованием режима суперосцилляций в зоне фокусировки). В этом случае определенный по строгой векторной теории дифракции диаметр лазерного пятна может составлять порядка  $0,36\lambda_w/NA$  и менее. По теории Торальдо нижнего предела не существует. Однако чрезмерная фильтрация Торальдо влечет за собой резкое увеличение побочных максимумов сфокусированного пятна (срезаемых на практике заградительными диафрагмами) и уменьшение энергии в полезном центральном максимуме. В настоящей работе, для уменьшения размера лазерного пятна при дальнепольной фокусировке, предлагается осуществить рациональное объединение собственно всех указанных факторов и методов по уменьшению размеров лазерного пятна, с достижением компромисса между данным размером и уровнями побочных максимумов.

Перспективные системы фокусировки, которые объединяют указанные факторы и методы, были предложены и численно проанализированы в недавних работах [6, 7]. Близких коммерческих аналогов данных систем в настоящее время не существует и по своим параметрам они являются уникальными. Данные системы построены на основе дифракционных оптических элементов (либо рефракционных аксиконов), специальных зеркальных оптических элементах, а также тонкопленочных конверторах поляризации из линейной в радиальную. В частности, как было определено, при использовании лазерного источника с длиной волны 266 нм и указанных конверторов поляризации, расчетные диаметры сфокусированных пятен составляют для сухих и иммерсионных фокусирующих систем, соответственно, 105 и 70 нм по уровню половинной интенсивности. В настоящее время системы находятся в стадии изготовления и экспериментальной проверки. Параллельно проводится тестирование фокусирующей системы на базе серийных сухих объективов при использовании лазерного источника с длиной волны 405 нм. Расчетный диаметр сфокусированного пятна такой системы (с конвертером радиальной поляризации, объективом с  $NA = 0,9$  и оценке по Аббе, по

половинному уровню интенсивности) составляет 230 нм.

### Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что лазерные методы безрезистного формирования масок на пленках металлов и кремния являются перспективным и гибким инструментом для изготовления амплитудных дифракционных структур с высоким пространственным разрешением. Нелинейный меха-

низм записи позволяет уменьшить ширину записываемого трека за счет снижения поглощения пленки в центре лазерного пучка примерно до 1,5–2 раз. Снижение длины волны и применение специально разработанной системы острой фокусировки и преобразования поляризации лазерного пучка может дополнительно под- нять пространственное разрешение в 2–4 раза.

### Благодарность

Данная работа поддержана грантом РНФ № 17-19-01721.

### Список источников

- [1] **Gotchiyaev, V. Z.** High resolution optical recording on a-Si films / V. Z. Gotchiyaev, V. P. Korolkov, A. P. Sokolov, V. P. Chernukhin // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 1991. — 137&138. — P. 1297–1300.
- [2] **Metev, S. M.** Thermochemical action of laser radiation on thin metal films / S. M. Metev, V. P. Veiko, S. G. Savchenko et. al. // *Proc. IEEE Journ. Quant. Electr.* — 1981. — 17. — № 9. — P. 2004–2007.
- [3] **Коронкевич, В. П.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в пленках хрома / В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, Е. Г. Чуринов, Ю. И. Юрлов // *Квантовая электроника*. — 1985. — 12. — № 4. — С. 755–761.
- [4] **Волков, А. В.** Высокоразрешающая лазерная запись контактных масок на пленках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А. В. Волков, О. Ю. Моисеев, С. Д. Полетаев // *Компьютерная оптика*. — 2013. — № 37 (2). — 222–225.
- [5] **Dostovalov, A. V.** Oxide composition and period variation of thermochemical LIPSS on chromium films with different thickness / A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, K. A. Okotrub, K. A. Bronnikov, S. A. Babin // *Opt Express*. — 2018. — № 26 (6). — P. 7712–7723.
- [6] **Полещук, А. Г.** Оптимизация параметров высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива / А. Г. Полещук, А. Г. Седухин // *Труды XII Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2015»*. 12–15 октября 2015 г., г. Казань, Россия. — С. 319–321.
- [7] **Sedukhin, A. G.** Efficient tight focusing of laser beams optimally matched to their thin-film linear-to-radial polarization conversion: Method, implementation, and field near focus / A. G. Sedukhin, A. G. Poleshchuk // *Opt. Commun.* — 2018. — № 407. — С. 217–226.

## Increasing the spatial resolution of resistless laser writing of diffractive structures

*A. G. Poleshchuk<sup>1</sup>, V. P. Korolkov<sup>1</sup>, A. G. Sedukhin<sup>1</sup>, V. P. Veiko<sup>1,2</sup>, A. A. Kutanov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Institute of Physical and Technological Problems and Materials Science, National Academy of Science of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

Various techniques, effects, and factors are considered for increasing the spatial resolution of resistless laser writing of diffractive structures on the films of metals and semiconductors by the thermal action of focused laser irradiation.

**Keywords:** Resistless laser writing, Thermochemical method of laser writing, Diffractive optical elements, Laser technologies.