

*В. П. Корольков*¹, А. И. Малышев¹, С. К. Голубцов¹, Р. И. Куц¹, А. Р. Саметов¹*

Лазерные и вакуумно-плазменные технологии микроструктурирования для задач оптического приборостроения

¹Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: victork@iae.nsk.ru

Аннотация. В работе рассмотрен технологический комплекс, необходимый для штучного и мелкосерийного производства дифракционных и микрооптических элементов на основе лазерных и вакуумно-плазменных технологий. Комплекс включает установку магнетронного напыления тонких пленок, круговую лазерную систему для безрезистной термохимической записи микроструктур на пленках хрома, X-Y систему лазерной литографии на фоторезисте и установки реактивного ионного травления. Проведен анализ опыта использования технологического оборудования во взаимосвязи с контрольно-измерительными приборами, необходимыми для характеристики формируемых микроструктур.

Ключевые слова: лазерная запись, пленки хрома, пленки фоторезиста, реактивное ионное травление, магнетронное напыление пленок, дифракционные оптические элементы

*V. P. Korolkov*¹, A. I. Malyshev¹, S. K. Golubtsov¹, R. I. Kuts¹, A. R. Sametov¹*

Laser and Vacuum-Plasma Technologies of Microstructuring for Problems of Optical Instrument Making

¹ Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: victork@iae.nsk.ru

Abstract. The paper considers the technological complex necessary for piece and small-scale production of diffractive and microoptical elements based on laser and vacuum-plasma technologies. The complex includes an installation for magnetron sputtering of thin films, a circular laser system for resistless thermochemical writing of microstructures on chromium films, an X-Y system for laser lithography on a photoresist, and a reactive ion etching installation. An analysis was made of the use of technological equipment in conjunction with instrumentation necessary for characterizing the formed microstructures.

Keywords: laser writing, chromium films, photoresist films, reactive ion etching, magnetron sputtering of films, diffractive optical elements

Введение

Возрастающие потребности оптического приборостроения в дифракционных и микрооптических элементах ставят задачу создания малых, а затем и крупных производственно-технологических комплексов, специализированных именно для задач микроструктурирования оптических элементов (МОЭ) с потребностью в развитии технологий и комплектовании технологических линий для их производства. На рис. 1 показаны варианты последовательности основных операций технологий, применимых для формирования МОЭ. Технология плавления фоторезиста (а) применяется только для изготовления микролинзовых

растров [1] и при формировании круглой формы столбиков фоторезиста и последующего их расплавления для образования микролинз со сферической поверхностью из-за поверхностного натяжения жидкости; б – технология прямой лазерной записи микрорельефа на фоторезисте [2], используется как для многоуровневых так и бинарных фазовых микроструктур; в – технология прямой лазерной записи на фоторезисте с подслоем хрома [3], используется для формирования амплитудных микроструктур и химически стойких масок для травления подложки; г – термохимическая технология прямой записи на пленках хрома [4,5], используется для тех же задач, что и технология прямой записи по фоторезисту, но требует меньшего количества технологических этапов производства и существенно проще в реализации, если необходимо сформировать микроструктуру большой площади на толстой и тяжелой подложке.

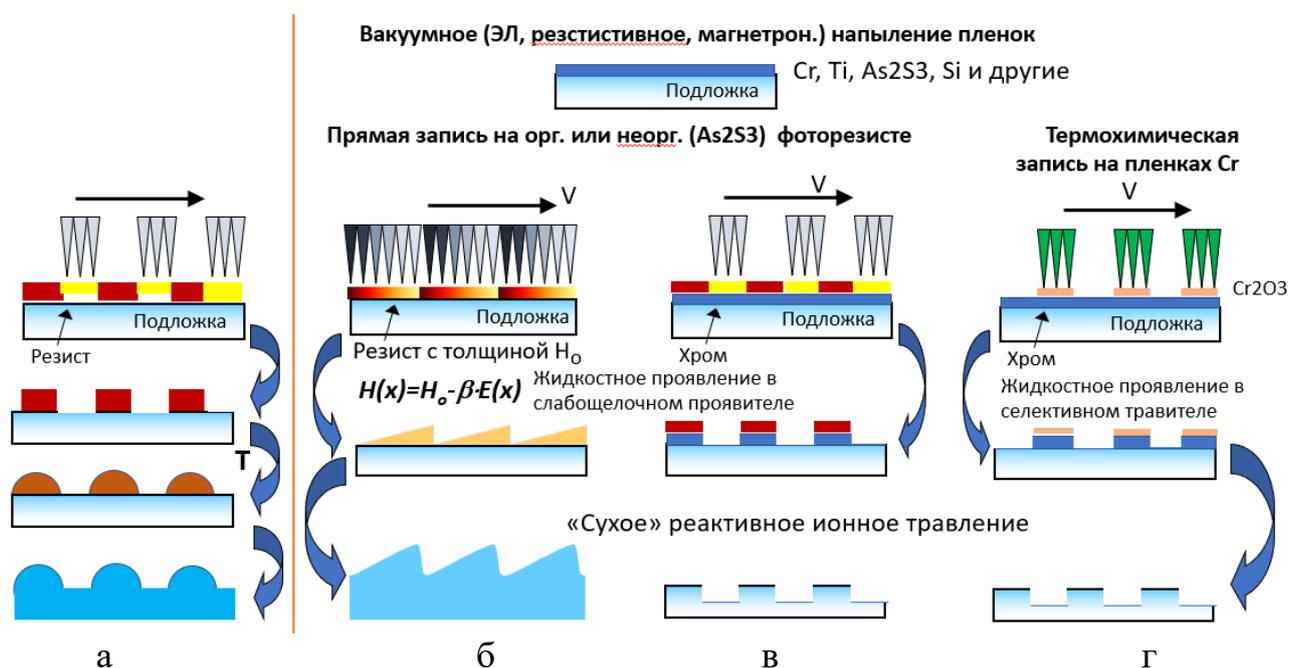


Рис. 1. Варианты совместного использования лазерных и вакуумно-плазменных технологий: а – технология плавления фоторезиста; б – технология прямой лазерной записи на фоторезисте; в – технология прямой лазерной записи на фоторезисте с хромовым подслоем; г – термохимическая технология прямой записи на пленках хрома

Все перечисленные технологии завершаются «сухим» реактивным ионным травлением оптической подложки (плавленый кварц, кремний) через рельефную маску в фоторезисте или хrome, если необходимо сформировать механически и химически устойчивый фазовый микрорельеф с широким диапазоном изменения характеристик окружающей среды и работающий даже при высокой плотности мощности проходящего оптического излучения. Для вариантов (а) и (б) возможно также изготовление никелевой реплики методом гальванопластики и последующее тиражирование полимерных микроструктурированных элементов.

Установки напыления тонких пленок

Напыленные тонких пленок металлов и диэлектриков широко используется в оптической промышленности и научных исследованиях. Металлические пленки применяют для создания всевозможных маскирующих покрытий, например, фотошаблонов для операций фотолитографии. Диэлектрические пленки необходимы для создания просветляющих и защитных покрытий оптических изделий. В ИАиЭ СО РАН для напыления тонких пленок хрома, используемых при термохимической записи, используется установка прецизионного магнетронного напыления АТС-2200Н (АЖА (США)) (рис. 2), позволяющая напылять хром на подложки диаметром до 350 мм. Для напыления покрытий для экспериментов по лазерному воздействию на различные пленочные материалы используется установка магнетронного осаждения покрытий VSE-PVD-100-2 (ООО «Вакуумные системы и электроника»).



Рис. 2. Установка магнетронного распыления

Установки лазерной литографии

Современные установки лазерной литографии можно разделить на два типа в зависимости от способа сканирования: X – Y -системы с линейной разверткой и системы, работающие с высокоскоростной круговой и/или спиральной разверткой. X – Y -системы больше подходят для записи элементов, которые легко задаются в декартовых координатах, таких как одномерные регулярные решетки, цилиндрические линзы и многопучковые светоделители. Круговые системы предпочтительнее для записи аксиально-симметричной фокусирующей оптики, корректоров волнового фронта, генераторов бесселевых пучков и дифракционных оптических элементов (ДОЭ), структура которых задана в полярных координатах.

Преимущества круговых лазерных записывающих систем (КЛЗС): высокая скорость записи, высокая точность круговой траектории, меньшие ошибки дискретизации для осесимметричных ДОЭ. Недостатком КЛЗС является жесткая привязка расчетных данных к началу координат. Отличие реального радиуса от расчетного приводит к ошибке фазы. Зависимость линейной скорости сканирования от радиальной координаты записывающего пучка делает технологию записи в круговых сканирующих системах лазерной записи существенно более сложной. Но, в то же время, непрерывное сканирование по угловой координате

обеспечивает высокую скорость записи благодаря отсутствию остановок в начале и в конце кадра.

В ИАиЭ СО РАН имеется КЛЗС собственной разработки CLWS-300IAE [6,7], фотография которой показана на рис. 3,а. Подложка (максимальная толщина – 24 мм) с тонкой пленкой хрома закрепляется вакуумным прижимом на планшайбе аэростатического шпинделя. Датчик угла поворота установлен на оси шпинделя и формирует импульсы для стабилизации скорости вращения и синхронизации лазерной записи с углом поворота подложки. Твердотельный лазер с длиной волны 532 нм установлен на гранитном основании КЛЗС. Лазерное излучение модулируется двумя акустооптическими модуляторами независимо по каждой координате. Система управления интенсивностью излучения обеспечивает амплитудно-импульсную модуляцию лазерного излучения и подавление его флуктуаций по сигналу фотоприемника со световой обратной связью. Головка автофокусировки записывающего объектива смонтирована на подвижном линейном позиционере с воздушными подшипниками. Объектив формирует пятно на поверхности подложки диаметром 0,6 мкм (по уровню $\frac{1}{2}$). Максимальный диаметр поля записи равен 230 мм. Регистрирующий материал – пленка хрома.

ИАиЭ СО РАН также располагает установкой лазерной литографии DWL66+HiRes [8] производства Heidelberg Instruments (Германия). Ключевые особенности этой установки (рис. 3,б):

- максимальная область записи: 200 x 200 мм²;
- толщина подложки: 1–13 мм;
- длина волны: 375 нм;
- минимальный размер формируемого элемента: 0,3 / 0,6 / 1 мкм;
- полутоновая шкала: 256 уровней;
- адресная сетка: 5 / 10 / 50 нм;
- скорость экспонирования: 2 / 10 / 110 мм²/с;
- регистрирующий материал: пленки фоторезистов.



Рис. 3. Установки лазерной литографии: а – КЛЗС CLWS300-IAE, б – DWL66+HiRes

Установки реактивного ионного травления

Для создания микрорельефа на оптической поверхности широкое распространение получили установки реактивного ионного травления (РИТ) диодного типа (на постоянном токе и с ВЧ-возбуждением) с параллельно расположенными электродами, один из которых заземлен, а на другом располагается подложка. В ИАиЭ СО РАН работает установка такого типа – Plasmalab 80+ (Oxford Instruments, Великобритания). Несмотря на довольно простую конструкцию, установка позволяет получить очень высокую равномерность скорости травления по площади больших подложек, толщина которых может достигать 20 мм (ограничивается возможностью старта разряда). При травлении кварцевой подложки через рельефную фоторезистную маску в плазме CF_4 скорость травления специально снижается за счет малой мощности ВЧ разряда (100 Вт) и периодических пауз для остывания подложки. Состав газовой смеси, подводимая мощность, рабочее давление, расход газов подбирают так, чтобы обеспечить равные скорости удаления фоторезиста и нижележащего слоя.

Следующим поколением систем РИТ являются установки с индуктивно связанной плазмой. Из отечественных можно выделить установки «Плазма ТМ 200-01» (ОАО «НИИТМ») [9] (рис. 4,б) и «Caroline PE15» (АО «Эсто-Вакуум») [10]. Установки позволяют проводить процесс глубокого реактивного-ионного травления на пластинах диаметром до 200 мм. Они снабжены генератором плазмы высокой плотности со своим ВЧ-генератором возбуждения плазмы (частотой 13,56 МГц) и специальным столом с подачей от независимого генератора ВЧ-смещения для вытягивания и ускорения ионов из плазмы. Обеспечивают потоки ионов $5\div 10$ мА/см² с энергией от 20 до 300 эВ, регулируемой генератором смещения подложки. Несмотря на прогрессивную конструкцию, для травления подложки через рельефную фоторезистную маску скорость травления приходится снижать на 1–2 порядка, чтобы избежать эрозии фоторезиста. Фактически, использование данных установок в производстве дифракционной оптики оправдано только для травления через хромовую маску.

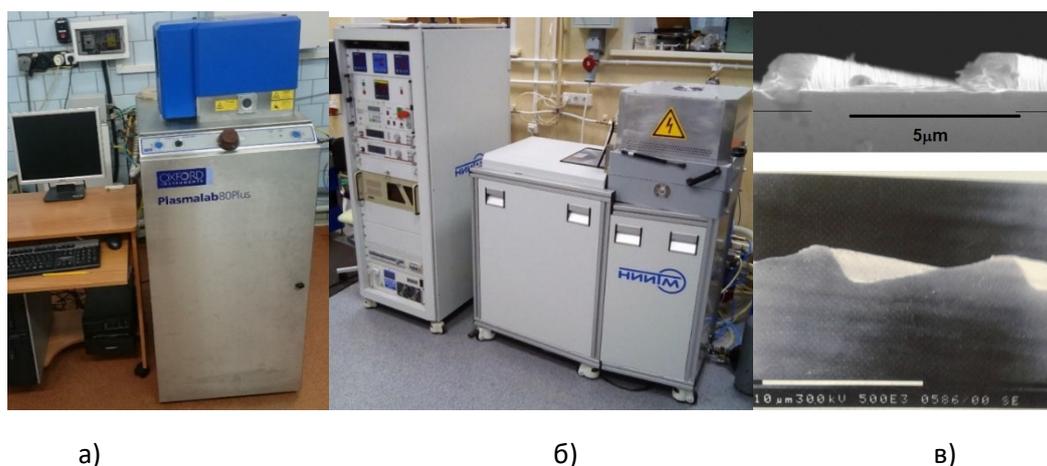


Рис. 4. Установки РИТ: а – установка РИТ Plasmalab 80+, б – установка РИТ Плазма ТМ 200-01, в – примеры рельефа на поверхности кварцевой подложки

Заключение

Для производства дифракционных и микрооптических элементов необходима технологическая линейка разнообразного оборудования: линия жидкостной химической обработки заготовок, центрифуга для нанесения фоторезиста, установка напыления покрытий, установка лазерной литографии, установка контактной литографии, установка реактивного ионного травления. Для контроля изделий на разных стадиях производства необходимы также микроскоп, оптический и стилусный профилометр, оптический дифрактометр.

При выборе технологического и метрологического оборудования необходимо иметь в виду существенную разницу между задачами и материалами микроэлектронного производства и изготовления дифракционной оптики и микрооптики.

Благодарности

При выполнении работы использованы средства субсидии на финансовую поддержку государственного задания (№ гос. регистрации 121041500060-2). Все упомянутое оборудование включено в ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. O'Neill F. T., Sheridan J. T., "Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments", *Optik*, Vol. 113, N 9 (2002), pp. 391–404.
2. Gale M.T., Rossi M., Pedersen J., Schuetz H., "Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists," *Opt. Eng.*, Vol. 33, N 11 (1994), pp. 3556–3566.
3. Wang Q., Griesmann U., "Versatile bilayer resist for laser lithography at 405 nm on glass substrates", *Opt. Eng.* 52(10) 105104 (2013).
4. Veiko V. P., Poleshchuk A. G., "Laser-induced local oxidation of thin metal films: physical fundamentals and applications," in *Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies*, Veiko V. P. and Konov V. I., eds., Vol. 195 of Springer Series in Materials Science (Springer Verlag, New York, 2014), Chap. 7, pp. 149–172.
5. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в пленках хрома // *Квантовая электроника*. – 1985. – 12. – № 4. – С. 755–761.
6. R. V. Shimansky, A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov, et al., "Alignment of the Writing Beam with the Diffractive Structure Rotation Axis in Synthesis of Diffractive Optical Elements in a Polar Coordinate System," *Avtometriya* 53 (2), 30–38 (2017).
7. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P., Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Applied Optics*. – 1999. – V.38. – N 8. – Pp. 1295–1301.
8. DWL 66+ [электронный ресурс]. – URL: <https://heidelberg-instruments.com/product/dwl-66-laser-lithography-system/>.
9. Плазма ТМ 200-02 [электронный ресурс]. – URL: <http://niitm.ru/плазма-тм-200-02/>.
10. Автоматизированная шлюзовая установка плазмохимического и ионнохимического травления Caroline PE15 [электронный ресурс]. – URL: http://ru-vem.ru/index/caroline_pe15/0-25.

© В. П. Корольков, А. И. Малышев, С. К. Голубцов, Р. И. Куц, А. Р. Саметов, 2023