

УДК 534.4 : 621.317

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРООПТИКЕ.
Ч. 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФОТОШАБЛОНОВ
С АМПЛИТУДНЫМ ПРОПУСКАНИЕМ***

**В. П. Вейко¹, В. П. Корольков², А. Г. Полещук²,
Д. А. Синев¹, Е. А. Шахно¹**

¹*Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики (Университет ИТМО),*

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49

²*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

E-mail: VadimVeiko@mail.ru

Представлен обзор исследований, выполненных коллективами Университета информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург) и Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск) в области разработки лазерных технологических процессов для формирования структуры дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и фотошаблонов с амплитудным бинарным и полутоновым пропусканием. Приведены результаты исследований лазерной термохимической технологии изготовления хромовых ДОЭ, технологий изготовления полутоновых ДОЭ и фотошаблонов на основе применения аморфного кремния и LDW-стекла.

Ключевые слова: лазерная технология, термохимия, лазерная запись, аморфный кремний, LDW-стекло, полутоновые фотошаблоны.

DOI: 10.15372/AUT20170507

Введение. Расширение области применения дифракционных и микрооптических компонентов во многих отраслях промышленности, особенно таких, как оптическая связь, приборостроение и биомедицина, стимулировало потребность в развитии технологий и оборудования для их производства. При этом акцент в новых разработках поставлен на повышение разрешающей способности, производительности и точности процессов формирования микрорельефа. Существенная часть технологий создания оптических элементов с микрорельефом основана на применении лазерного излучения. До настоящего времени для изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ) главным образом использовались технологии и оборудование, ранее созданные для производства изделий микроэлектроники. Однако структура поверхности ДОЭ имеет произвольный характер, задаваемый распределением фаз световой волны, тогда как поверхность микросхем представляет собой систему прямоугольников. Структура поверхности ДОЭ может иметь минимальные размеры — менее половины длины волны света (0,1–0,5 мкм), а общие размеры могут достигать десятков сантиметров и даже метров в диаметре, что во много раз больше размеров кристалла микросхемы. Требования современной дифракционной оптики ставят задачи, которые не имеют адекватного решения из-за отсутствия технологических комплексов (сочетание устройств и технологии) для микропрофилирования оптических поверхностей с минимальным размером элементов микроструктуры до 100 нм и световым полем до 200–300 мм и более. Абсолютная точность топологии элемента необходима на уровне

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01721).

1/20 от размера наименьшей дифракционной зоны. Кроме того, высота рельефа синтезируемой структуры должна плавно меняться на одном скате при крутом переходе от зоны к зоне. Таким образом, разработка новых технологий синтеза ДОЭ представляется весьма актуальной.

Существенный вклад в развитие технологий синтеза дифракционных и микрооптических элементов внесли исследования, выполненные в Институте автоматизации и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН и в Национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (Университете ИТМО) как совместно, так и по отдельности. Объединяющим направлением стало развитие лазерной термохимической технологии (ЛТХТ), впервые предложенной в ИТМО и доведённой до практического уровня в ИАиЭ СО РАН. Предлагается обзор исследований, которые выполнили оба коллектива за последние десятилетия в области разработки лазерных технологических процессов для формирования структуры дифракционных и микрооптических элементов. Его целью является сведение воедино основных положений ключевых публикаций по различным подходам к синтезу элементов микрооптики и анализ причин, по которым разрабатываемые методы были внедрены либо оказались не востребованы. Данная работа посвящена технологиям изготовления ДОЭ и фотошаблонов с амплитудным пропусканием.

Методы прямой лазерной записи при изготовлении амплитудных ДОЭ. Традиционный способ изготовления амплитудных ДОЭ [1] (а также фотошаблонов микросхем [2]) включает несколько последовательных этапов (рис. 1, *a*). На первом этапе на поверхность подложки наносится тонкая плёнка хрома. Далее поверхность покрывается слоем фоторезиста. На втором этапе фоторезист экспонируется УФ-излучением через маску (фотошаблон) или сфокусированным лазерным пучком. Засвеченные области становятся растворимыми и удаляются при последующем жидкостном (или плазменном) проявлении. Далее рисунок фоторезистивной маски переносится в плёнку хрома путём травления открытых областей. На последнем этапе проводится удаление оставшегося фоторезиста. Двухступенчатый процесс (в фоторезисте, а затем в хrome) вносит дополнительные изотропные искажения, которые составляют 0,1–0,5 мкм при контактной литографии [3].

Очевидно, что непосредственное (прямое) формирование рисунка в плёнках хрома или любого другого поглощающего вещества позволит существенно упростить процесс

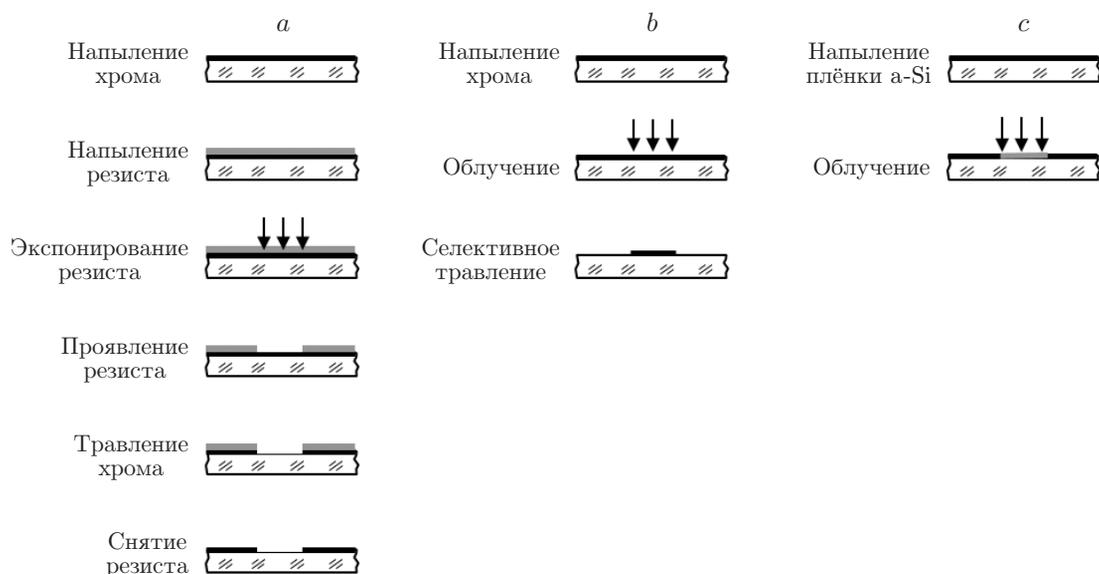


Рис. 1. Последовательность операций при изготовлении ДОЭ: классическим методом (*a*), с использованием термохимической (*b*) и термоструктурной (*c*) технологий

изготовления ДОЭ и улучшить его точность. Наиболее известный безрезистный способ изготовления бинарных (имеющих два уровня пропускания) фотошаблонов основан на прямом испарении (абляции) хромового слоя под действием лазерного излучения [4, 5]. Этот метод позволяет получить высокую разрешающую способность, которая ограничена возможностями оптики или термическими искажениями, исключить операции, связанные с проявлением (травлением), упростить требования к свойствам плёнок и обеспечить значительный выигрыш в производительности. Однако такие недостатки, как мозаичность структуры, матирование подложки, частичная диффузия материала плёнки в подложку, образование микротрещин и «брустверов» из расплавленного металла на границах зон оказывают значительное влияние на качество формируемого рисунка и ограничивают его применение для производства ДОЭ.

Существенного улучшения качества формирования структуры ДОЭ можно добиться при использовании термохимических и термофизических процессов при температурах ниже температуры плавления $T_{пл}$. Под действием локального нагрева ($T < T_{пл}$) лазерным излучением в тонких плёнках протекают локализованные химические и физические процессы, образуя «скрытое изображение». Материал в области этого изображения отличается по своим химическим и физическим свойствам от свойств исходной плёнки, что даёт возможность «проявить» его различными способами. Точность термохимического метода выше из-за уменьшения термических искажений. Процесс формирования дифракционной структуры с использованием ЛТХТ [6–8] иллюстрирует схема, представленная на рис. 1, *b*. При лазерном облучении плёнки хрома, а также некоторых других металлов [9] образуется тонкий слой окисла, который играет роль защитной маски. Обработкой плёнки в селективном травителе удаляется необлучённый хром [10]. Следовательно, ЛТХТ позволяет реализовать негативный метод изготовления амплитудного ДОЭ без применения резиста и включает существенно меньше стадий, чем классическая фотолитография (см. рис. 1, *a*). Напыляемые неорганические резисты на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) также могут быть использованы для производства ДОЭ методом прямой лазерной записи [11], включающей три этапа: нанесение плёнки ХСП, облучение и проявление.

Наименьшее количество этапов имеет лазерная технология прямого формирования изображений (ЛТПФИ) в плёнках аморфного кремния (a-Si) [12] или в поверхностно модифицированном LDW-стекле [13], схематически показанная на рис. 1, *c*. Эта технология включает только нанесение и облучение плёнки. Воздействие лазерного облучения приводит к просветлению плёнки a-Si или поверхностного слоя LDW-стекла без участия каких-либо проявителей. Изменение пропускания происходит непосредственно под действием нагрева излучением. Анализ общих черт ЛТПФИ и ЛТХТ приведён в таблице.

Так как технологические процессы неразрывно связаны с оборудованием для их осуществления, кратко опишем лазерную записывающую систему (ЛЗС), с помощью которой на практике реализованы ЛТХТ и ЛТПФИ.

Лазерная записывающая система. В ИАиЭ СО РАН разработана и создана круговая ЛЗС (генератор изображений) CLWS-300IAE [14, 15] для изготовления высококачественных ДОЭ в полярной системе координат. В настоящее время ЛЗС этого типа достаточно широко используются в оптической промышленности [16–18] и научных исследованиях [19]. Упрощённая схема ЛЗС приведена на рис. 2. Подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью ($12\text{--}15\text{ с}^{-1}$), в то время как сфокусированный записывающий пучок лазерного излучения (используется два лазера с длинами волн 405 и 532 нм) перемещается вдоль прямой линии, пересекающей центр вращения. Это даёт возможность достичь высокой скорости записи. При установке мультипликатора перед фокусирующим объективом реализуется метод многопучковой записи [20]. В качестве светочувствительного материала используются плёнки хрома и

Основные достоинства и недостатки ЛТХТ и ЛТПФИ

Преимущества	Недостатки
Сокращение числа операций, экономия ресурсов	Термочувствительный материал требует существенно большей мощности пучка для записи, чем фоторезист
Возможность нанесения светочувствительного слоя на большие или криволинейные поверхности	Требуется специальная технология напыления плёнок
Небольшой диапазон изменения мощности пучка при изменении скорости его сканирования на несколько порядков	Пространственное разрешение хуже при малых скоростях движения пятна
Пространственное разрешение до 2000 мм^{-1} для записи с длиной волны около 500 нм	Допустимая толщина не более 200 нм для плёнок хрома и 100 нм для плёнок кремния
Любая длина волны экспонирования (от УФ до ИК)	Неравномерность толщины плёнки $<10 \%$ для бинарных фотошаблонов и $<5 \%$ для полутонковых фотошаблонов
Возможность контроля процесса записи по изменению отражения плёнки	—
Пороговый эффект: возможность работы на свету и применение обычной фокусирующей оптики	—

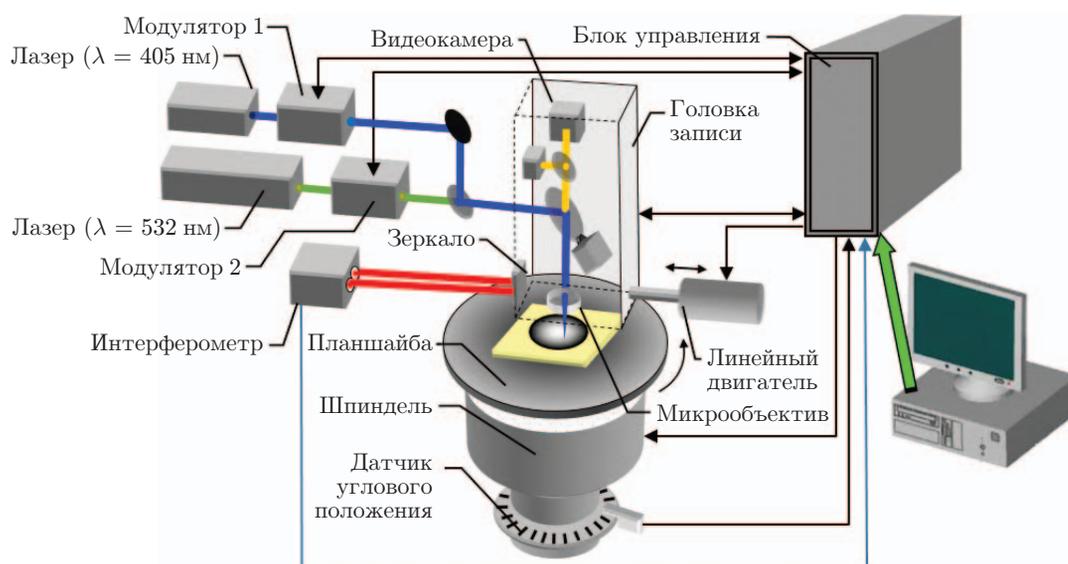


Рис. 2. Упрощённая функциональная схема ЛЗС типа CLWS-300IAE

фоторезиста. Лазерная записывающая система позволяет экспонировать подложки диаметром до 300 мм, покрытые хромом или фоторезистом. Погрешность перемещения записывающего пятна (диаметр около 0,6 мкм FWHM) по радиусу составляет менее 20 нм, а в угловом направлении — около 1 угл. с.

Лазерная термохимическая технология на плёнках хрома. При нагревании тонкой металлической плёнки лазерным излучением в ней активируется ряд физико-химических процессов, например адсорбция кислорода на поверхности, диффузия ионов металла и кислорода, химическая реакция окисления металла с образованием слоя окисла и т. п. [21]. Скорость роста толщины слоя окисла H в зависимости от температуры T определяется соотношением скоростей указанных процессов. Толщину слоя окисла в течение некоторого эквивалентного времени нагрева t_e можно определить как [22]

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_e},$$

где B — константа параболического закона окисления, T_a — энергия активации диффузионных процессов, выраженная в градусах Кельвина.

Если максимум температуры (T_{\max}) достигается в момент t_0 , то

$$t_e = \sqrt{2\pi T_{\max}^2 / (T_a |T''_{tt}(t_0)|)},$$

где T''_{tt} — вторая производная температуры по времени t .

Последующее травление плёнки формирует её топологию за счёт удаления участков плёнки, не защищённых слоем окисла.

При гауссовом распределении интенсивности в фокальном пятне (радиус $r_0 \sim 0,4$ мкм) термохимическое изображение может быть существенно меньше размеров лазерного пятна. Было показано, что отношение размера элемента, полученного на плёнке, к размеру облучённой области имеет вид [23, 24]

$$\frac{r}{r_0} \approx \sqrt{\frac{2 \ln(H_0/H_r)}{T_a/T_0}},$$

где $T_0 \approx 1220$ К — температура, достаточная для образования защитного слоя окисла хрома.

Так, при $H_r/H_0 = 0,8$ минимальный размер элемента составляет $r_{\min} = 0,1r_0$, что даёт возможность получить разрешающую способность при термохимической записи, превышающую пространственное разрешение фокусирующей оптики. Это значит, что теоретически размер элемента может быть много меньше размера фокального пятна и существенно меньше длины волны излучения. Результаты численных расчётов относительного изменения интенсивности $I_r = I(y)/I(0)$ (пунктирная кривая), температуры $T_r = T_{\max}(y)/T_{\max}(0)$ (сплошная кривая) и толщины плёнки окисла $H_r = H(y)/H(0)$ (штрихпунктирная кривая) в зависимости от расстояния от центра лазерного пучка при $h = 100$ нм, $r_0 = 0,5$ мкм, $T_{\max}(0) = 1600$ К, $H(0) = 8$ нм представлены на рис. 3, а.

Расчёты показали, что для окисления плёнки хрома толщиной 100 нм необходима мощность излучения P в интервале от 10 до 20 мВт при скорости сканирования V от 0,1 до 1 м/с и $r_0 \sim 0,4$ мкм, что согласуется с экспериментально полученными значениями. В зависимости от скорости сканирования мощность излучения должна изменяться в определённых пределах, чтобы, с одной стороны, толщина окисной плёнки превышала требуемое критическое значение и, с другой стороны, не происходило плавление хрома. Области допустимых значений мощности записывающего пучка в зависимости от скорости

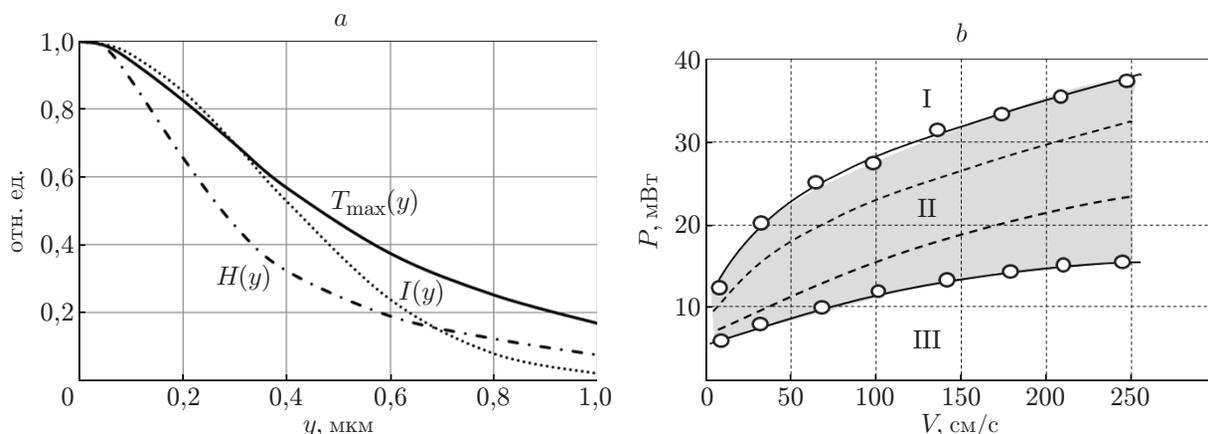


Рис. 3. Результаты моделирования ЛТХТ: *a* — поперечное распределение величин $H_r(y)$, $T_r(y)$ и $I_r(y)$; *b* — диапазон P при различных V . Толщина плёнки хрома 100 нм

сканирования, рассчитанные теоретически и полученные экспериментально, приведены на рис. 3, *b*, где I — область плавления, II — термохимическая область, III — отсутствие термохимических изменений. Кружки соответствуют экспериментально полученным значениям, а штриховые кривые — расчётным.

Селективное травление плёнок хрома. Исследования ряда известных травителей хрома (HCl , $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$ и HNO_3 , $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и NaOH , $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и KOH и др.) показали [25, 26], что наибольшими селективностью и качеством травления обладает раствор, составленный из $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и NaOH . Селективность максимальна для раствора, состоящего из шести объёмных частей 25 %-ного раствора $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и одной части 25 %-ного раствора NaOH , т. е. 1 мл травителя содержит 0,244 г $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и 0,046 г NaOH , общая плотность его раствора составляет 1,16 г/мл, а титр раствора равен 0,29 г/мл. Средняя продолжительность травления плёнки толщиной около 50 нм составляет 2–2,5 минуты. Скорость травления сильно зависит от степени разбавления травителя, в то время как коэффициент селективности остаётся практически неизменным.

Формирование линий заданной ширины. При изготовлении ДОЭ одним из основных требований является соблюдение заданной ширины формируемой дорожки по всей площади элемента. Однако из-за теплового способа записи ширина дорожек увеличивается с уменьшением скорости движения подложки. Исследование взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с движущейся плёнкой хрома проводилось на ЛЗС.

Скорость движения записывающего пятна изменялась от 4,4 до 175 см/с, что соответствует радиальной координате от 0,7 до 28 мм при скорости вращения 10 с^{-1} . Оптимальная мощность излучения, необходимая для термохимической записи (для указанного диапазона скоростей и размера пятна диаметром 0,4 мкм), находилась в пределах 10–30 мВт. В экспериментах использовались плёнки хрома толщиной 65 нм (магнетронное распыление) на стеклянных подложках. На рис. 4, *a* приведены зависимости мощности лазерного излучения от ширины дорожек для различных V и эти зависимости линейные. Минимально достижимая ширина дорожек увеличивается с уменьшением скорости движения и радиуса записи соответственно. Используя эти данные, можно построить зависимость изменения подводимой мощности от V при выбранном постоянном размере записываемой дорожки. Она является ключевой и вводится в компьютер для управления мощностью лазерного пучка во время записи. Варианты такой зависимости показаны на рис. 4, *b*. Интересной особенностью ЛТХМ является то, что при изменении скорости движения плёнки почти на три порядка изменение мощности лазерного излучения составляет всего 2,5–

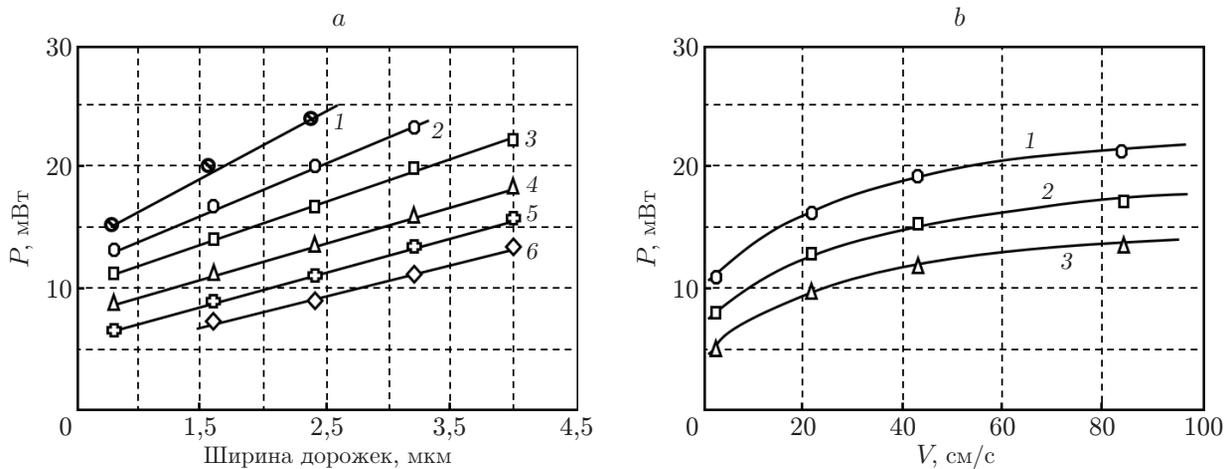


Рис. 4. Диапазоны мощности лазерного пучка с длиной волны 488 нм для записи на плёнке хрома толщиной 65 нм: *a* — зависимости мощности от ширины дорожек (кривая 1 — $V = 175$ см/с, 2 — 88, 3 — 44, 4 — 22, 5 — 8,8, 6 — 4,4), *b* — скорости движения подложки (кривая 1 — начало плавления ($P_{кр}$), 2 — ширина дорожки 2 мкм, 3 — 1 мкм)

3 раза. Даже при записи ДОО диаметром 220 мм относительное изменение мощности не превышало 5 раз. Такой небольшой динамический диапазон изменения мощности записи при широком диапазоне размеров ДОО (и соответственно скоростей записи) — существенное преимущество ЛТХМ перед записью на резистах и других фоточувствительных материалах.

Пространственное разрешение. Одним из основных критериев, показывающих пригодность того или иного материала в качестве регистрирующей среды, является пространственное разрешение. Оно определяется размером записываемого пятна и нелинейными свойствами материала. Как отмечалось выше, при термохимическом способе записи наблюдается расширение дорожек за счёт теплопроводности в плёнке и подложке. Однако, тщательно выдерживая режим записи, можно получить пространственное разрешение свыше 2000 мм^{-1} [27]. На рис. 5 показаны полученные экспериментально зависимости

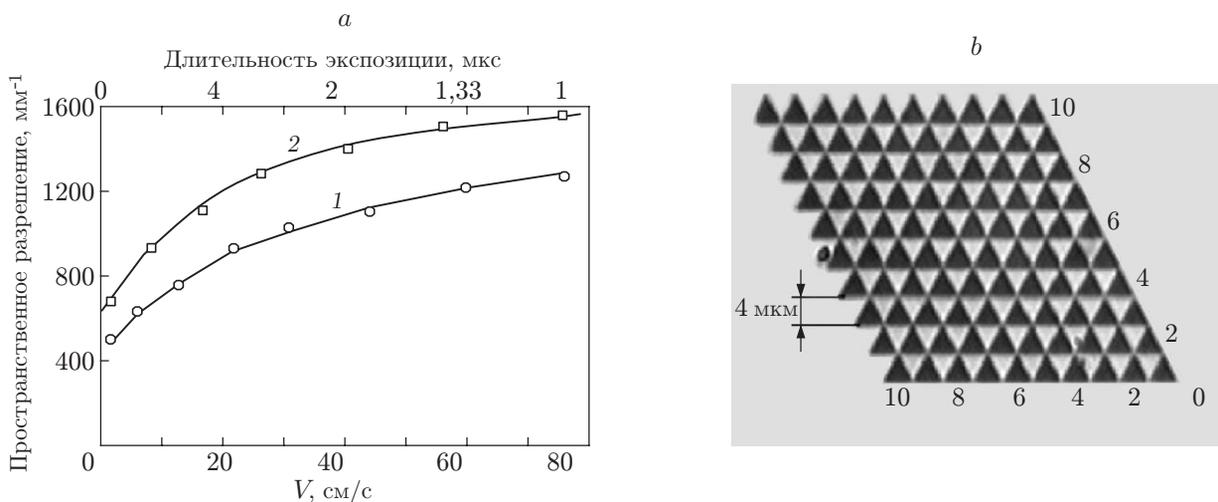


Рис. 5. Экспериментальные результаты применения ЛТХТ на плёнках хрома: *a* — зависимости пространственного разрешения от скорости движения (кривая 1 — толщина плёнки 50 нм; кривая 2 — 80 нм); *b* — фрагмент записанной структуры

пространственного разрешения от скорости движения записывающего пятна относительно плёнки и (для сравнения) характерное время экспозиции. Кривые приведены для двух типов плёнок, сформированных путём магнетронного (кривая 1) и термического (кривая 2) распыления. Микроструктуры на плёнках термического напыления имеют более низкое разрешение из-за образования микрокристаллов на краях линий («волосатость»). При больших скоростях движения плёнок магнетронного распыления пространственное разрешение превышает 1600 мм^{-1} . При скоростях ниже 30 см/с разрешение начинает ухудшаться, что обусловлено тепловым механизмом записи. Однако даже вблизи центра вращения пластины, когда скорость сканирования составляет менее 1 см/с , пространственное разрешение не падает ниже $400\text{--}500 \text{ мм}^{-1}$. Оно также зависит от типа записываемой структуры. В полярной системе координат, в которой работает ЛЗС, наибольшее разрешение достигается при записи круговых структур, так как отсутствует дискретизация. Произвольные структуры записываются, как правило, за много проходов лазерного пятна с перекрытием, что уменьшает пространственное разрешение. На рис. 5, *b* приведена микрофотография миры, составленной из равнобедренных треугольников высотой 4 мкм .

Прямая лазерная запись полутоновых фотошаблонов. Полутоновая фотолитографическая технология позволяет применить как многократную контактную печать без зазора, так и высокоразрешающую проекционную печать с уменьшением. Наиболее экономически эффективно изготавливать полутоновые фотошаблоны с помощью прямой лазерной записи сфокусированным пучком на материалах, изменяющих коэффициент поглощения при нагреве высокоинтенсивным лазерным излучением, но остающихся стабильными под воздействием актиничного ультрафиолетового излучения при переносе структуры шаблона в фоторезист.

Первоначально были исследованы плёнки аморфного кремния, нанесённые методами ионно-плазменного и магнетронного распыления, электронно-лучевого напыления и химического осаждения силана (с последующей термообработкой в вакууме для удаления водорода). Показано, что значительное уменьшение коэффициента пропускания наблюдается для плёнок всех типов [12, 14].

Контраст пропускания $T_{\text{ir}}/T_{\text{am}}$ (отношение коэффициента пропускания облучённой плёнки T_{ir} к коэффициенту пропускания исходной аморфной плёнки T_{am}) зависит от мощности записывающего пучка (рис. 6, *a*), диапазон которой, в свою очередь, зависит от скорости сканирования (рис. 6, *b*). Имеется достаточно большой участок линейной зависимости, который можно использовать для записи полутоновых изображений. Контраст пропускания $T_{\text{ir}}/T_{\text{am}}$ может достигать 10. Результаты исследования термоструктурной лазерной записи на плёнках аморфного кремния показали возможность полутоновой регистрации изображений с пространственным разрешением до 2000 мм^{-1} при диаметре записывающего пучка $0,6 \text{ мкм}$ (FWHM).

При исследовании ЛТПФИ на плёнках $\alpha\text{-Si}$ был обнаружен эффект оконтуривания дифракционных зон, возникающий из-за падения поглощения излучения лазерного пучка при записи с частичным перекрытием областей экспонирования соседних траекторий пучка. Как оказалось впоследствии, он характерен для полутонковой лазерной записи на всех материалах, пропускание которых увеличивается под действием лазерного излучения.

Следующим исследованным нами материалом для ЛТПФИ стали поверхностно-модифицированные LDW-стёкла [13, 28, 29]. Для их производства используют заготовки из цинко-боросиликатного стекла, подвергающиеся ионному обмену для введения ионов серебра в структуру боросиликатного стекла. Последующее облучение широким электронным пучком приводит к образованию металлических частичек серебра, резко повышающих оптическое поглощение поверхностного слоя стекла. Сфокусированный лазерный пучок осуществляет тепловое стирание окрашенных частичек за счёт преобразования метал-

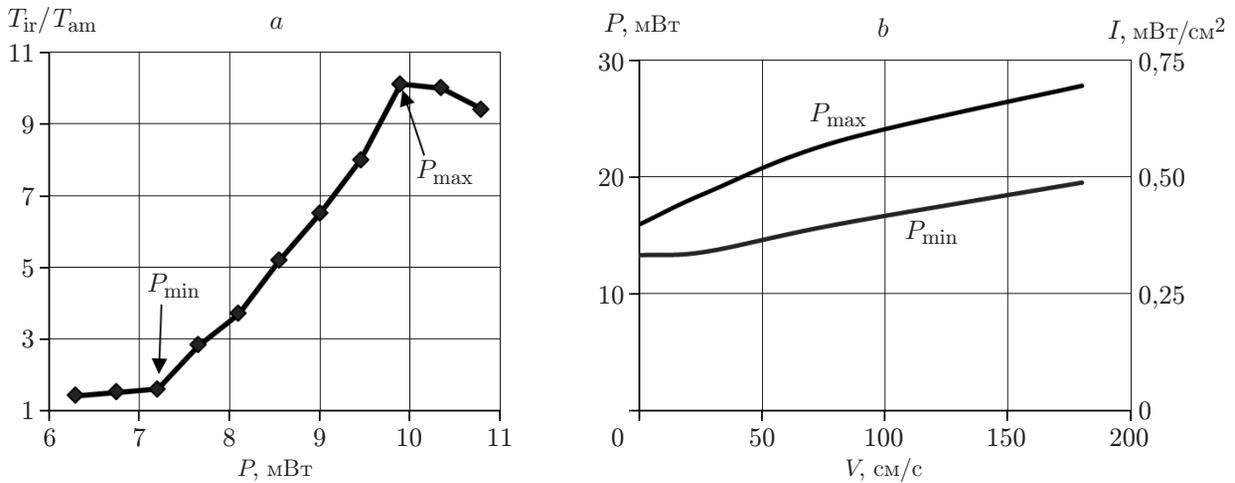


Рис. 6. Диапазоны изменения T_{ir}/T_{am} и мощности лазерного пучка с длиной волны 488 нм для записи на плёнке a-Si толщиной 100 нм: *a* — зависимость T_{ir}/T_{am} на длине волны 436 нм от мощности записывающего пучка для скорости 49 см/с; *b* — типичные зависимости диапазона мощности (от P_{min} до P_{max}) и интенсивности (правая ось) излучения для записи

лического серебра в ионы. Пропускание стекла зависит от мощности пучка, и его можно менять от первоначального значения 0,1–5 % до 70–80 % (рис. 7, *a*). Эксперименты проводились в основном на LDW-стекле типа I с исходной оптической плотностью 1,4, так как это стекло имеет самый тонкий окрашенный слой и соответственно лучшее пространственное разрешение.

Нами были определены кривые изменения мощности пучка, необходимого для получения заданного коэффициента пропускания при различных скоростях сканирования (рис. 7, *b*), исследовано пространственное разрешение и определена его взаимосвязь с изменением коэффициента пропускания. При диаметре лазерного пучка 0,8 мкм ширина дорожки не превышает 1 мкм в диапазоне коэффициента пропускания до 60 %.

Применение LDW-стёкол в качестве регистрирующей среды для круговых лазерных систем требует управления мощностью пучка с высокой точностью в большом диапазоне скорости сканирования. Особенно остро эта проблема возникает при записи вблизи

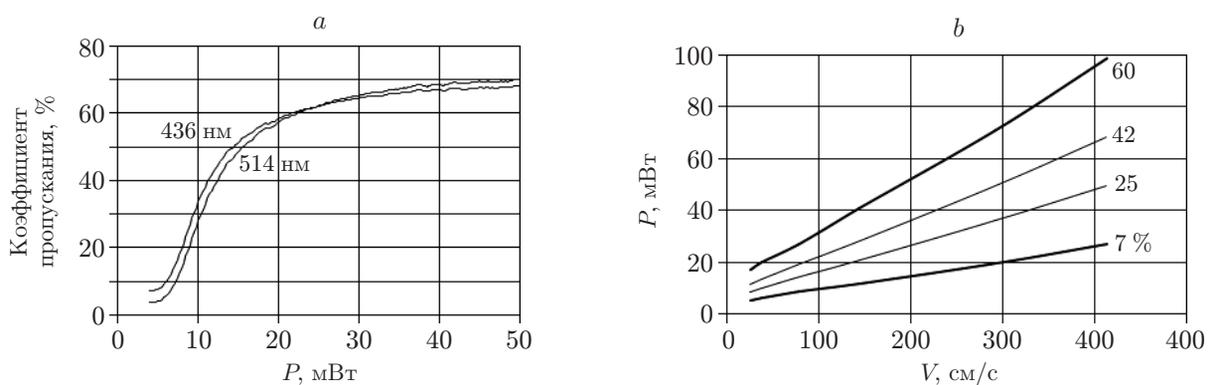


Рис. 7. Экспериментальные зависимости для LDW-стекла типа I: *a* — зависимости $T_{ir}(P)$ на длинах волн 514 и 436 нм ($V = 15$ см/с); *b* — зависимости $P(V)$ для четырёх значений T_{ir} (7; 25; 42; 60 %)

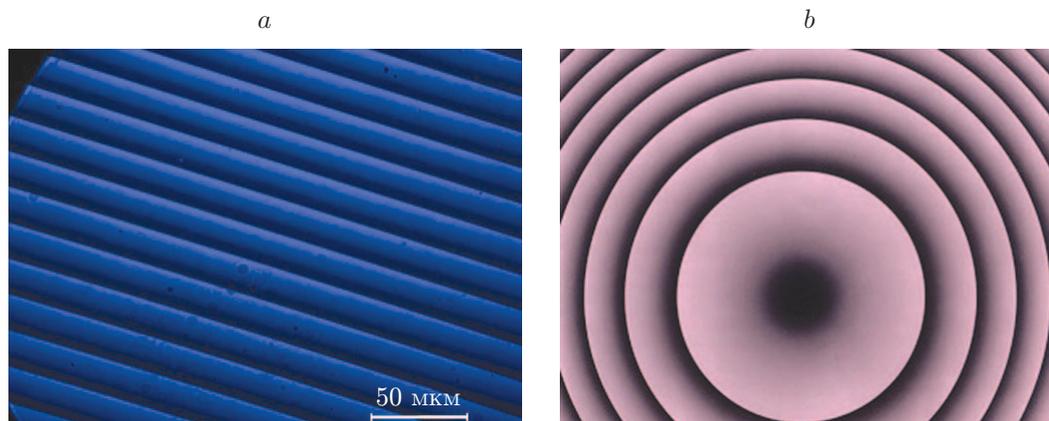


Рис. 8. Микрофотографии полутоновых фотошаблонов: *a* — на плёнке а-Si при освещении на длине волны 450–470 нм; *b* — на LDW-стекле при освещении белым светом

центра вращения (радиальная координата 0–1 мм). Для повышения точности записи полутоновых фотошаблонов предложено использовать метод импульсной записи вблизи центра вращения подложки. Период следования импульсов постоянной длительности изменяется обратно пропорционально радиальной координате записывающего пучка в целях сохранения коэффициента перекрытия зон облучения для соседних импульсов. При таком методе записи мощность лазерного пучка, необходимая для достижения заданного уровня пропускания, слабо зависит от скорости сканирования до 7–8 см/с. Длительность импульсов выбирается в диапазоне 0,4–1 мкс.

С применением исследованных материалов были записаны полутоновые фотошаблоны дифракционных структур, показанные на рис. 8. На обоих микроизображениях хорошо виден плавный характер изменения пропускания фотошаблона.

Заключение. Результаты проведённых исследований показывают, что ЛТХТ является мощным и гибким инструментом для изготовления амплитудных дифракционных элементов, бинарных фотошаблонов различного назначения, растров и шкал. Ряд этих методов уже практически апробирован и используется в оптическом приборостроении [30, 31]. Конкурентоспособность метода по сравнению с фоторезистной технологией связана с возможностью наносить плёнку хрома на разнообразные нестандартные подложки с большим размером и весом.

Исследования воздействия сфокусированного лазерного излучения на оптические свойства плёнок а-Si и LDW-стёкол в широком диапазоне скоростей сканирования показали возможность прямой лазерной записи полутоновых фотошаблонов. На плёнках а-Si пространственное разрешение достигает 2000 мм^{-1} , но коэффициент пропускания на длине волны 436 нм не поднимается в просветлённом лазерным пучком состоянии выше 10–20 %, что замедляет технологический процесс за счёт роста времени экспонирования фоторезиста при последующем фотолитографическом тиражировании ДОО. Для LDW-стёкол коэффициент пропускания на длине волны 436 нм может быть доведён до 60 %, но пространственное разрешение существенно ниже. Обнаруженный эффект оконтуривания дифракционных зон при лазерной записи полутоновых фотошаблонов существенно затрудняет получение заданного распределения коэффициента пропускания. Другими недостатками полутоновых материалов являются отсутствие их на рынке и высокая стоимость экспериментального производства заготовок с равномерным и воспроизводимым начальным (до записи фотошаблонов) пропусканием. В связи с этим ЛТПФИ не получила широкого распространения. Существенно более простым и экономически эффективным оказалось формирование заданного полутонового распределения экспозиции с помощью растрованного фотошаблона [32], записываемого, например, по термохимической технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Swanson G. J., Veldkamp W. B.** Diffractive optical elements for use in infrared system // *Opt. Eng.* 1989. **28**, N 6. P. 605–608.
2. **Doering R., Nishi Y.** Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. Boca Raton — London — New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007. 1720 p.
3. **Моро У.** Микролитография. Принципы, методы, материалы. М.: Мир, 1990. Ч. 1. 496 с.
4. **Вейко В. П., Либенсон М. Н.** Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973. 192 с.
5. **Okamoto T., Morishige Y., Ohmura E. et al.** Femtosecond laser ablation of Cr-SiO₂ binary mask // *Proc. SPIE.* 2003. **4830**. P. 510–514.
6. **Вейко В. П., Котов Г. А., Либенсон М. Н., Никитин М. Н.** Термохимическое действие лазерного излучения // *ДАН СССР.* 1973. **208**. С. 587–590.
7. **Коронкевич В. П., Полецук 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.
8. **Veiko V. P., Shakhno E. A., Poleshchuk A. G. et al.** Local laser oxidation of thin metal films: Ultra-resolution in theory and in practice // *Journ. Laser Micro Nanoen.* 2008. **3**, N 3. P. 201–205.
9. **Veiko V. P., Metev S. M.** Laser-assisted microtechnology. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. Vol. 19. P. 34–99.
10. **Metev S. M., Veiko V. P., Savchenko S. G. et al.** Thermochemical action of laser radiation on thin metal films // *Proc. IEEE Journ. Quant. Electr.* 1981. **17**, N 9. P. 2004–2007.
11. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Yurlov Yu. I., Mednikarov B.** Application of an evaporated photoresist (AsS) in the production of kinoform optical elements // *Journ. Imag. Sci.* 1986. **30**, N 3. P. 132–135.
12. **Гочияев В. З., Корольков В. П., Соколов А. П., Чернухин В. П.** Полутонная оптическая запись на пленках a-Si // *Квантовая электроника.* 1989. **16**, № 11. С. 2343–2348.
13. **Korolkov V. P., Malyshev A. I., Nikitin V. G. et al.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs // *Proc. SPIE.* 1999. **3633**. P. 129–138.
14. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Appl. Opt.* 1999. **38**. P. 1295–1301.
15. **Шиманский Р. В., Полецук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В.** Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при изготовлении ДОО в полярной системе координат // *Автометрия.* 2017. **53**, № 2. С. 30–38.
16. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б.** Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) // *Оптический журнал.* 2007. **74**, № 12. С. 40–49.
17. **Guhr J.** Test results of the laser writing system CLWS-300c // *Diffract. Opt.* 1997. **12**. P. 206–207.
18. **Piero P., Sinezi S., Ripetto M., Usplenev G. V.** Using the circular laser writing system for fabrication of DOE grayscale masks on the base of LDW glass plates // *Comput. Opt.* 1997. N 17. P. 85–93.
19. **Казанский Н. Л.** Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // *Компьютерная оптика.* 2006. № 29. С. 58–77.
20. **Полецук А. Г., Саметов А. Р., Седухин А. Г.** Многопучковая прямая лазерная запись дифракционных микроструктур // *Автометрия.* 2012. **48**, № 4. С. 3–11.

21. **Котов Г. А., Либенсон М. Н.** Теория роста тонких окисных пленок на поверхности металла при импульсном нагревании // *Электронная техника*. 1973. Сер. 6. Вып. 4. С. 56–64.
22. **Либенсон М. Н.** Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. С.-Пб.: Наука, 2007. 423 с.
23. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полецук А. Г. и др.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур // *Квантовая электроника*. 2011. **41**, № 7. С. 631–636.
24. **Veiko V. P., Poleshchuk A. G.** Laser-induced local oxidation of thin metal films: Physical fundamentals and applications // *Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies*. /Eds. V. P. Veiko, V. I. Konov. 2014. Vol. 195. P. 149–171.
25. **Коронкевич В. П., Полецук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // *Письма в ЖТФ*. 1985. **11**, № 3. С. 144–148.
26. **Cherkashin V. A., Churin E. G., Burge J. H. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // *Proc. SPIE*. 1997. **3010**. P. 168–179.
27. **Полецук А. Г., Голубцов С. К., Саметов А. Р.** Экспериментальное исследование особенностей сверхлокальной лазерной термохимической нанолитографии // *Международ. науч. конф. «СибОптика-2017»*. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. Ч. 1. С. 52–56.
28. **Pat. 5285517 US.** High energy beam sensitive glasses /C.-K. Wu. Publ. 08.02.1994.
29. **Korolkov V. P., Malyshev A. I., Nikitin V. G. et al.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs // *Proc. SPIE*. 1999. **3633**. P. 129–138.
30. **Burge J. H., Anderson D. S., Milster T. D., Vernold C. L.** Measurement of a convex secondary mirror using a holographic test plate // *Proc. SPIE*. **2199**. 1994. P. 193–198.
31. **Кручинин Д. Ю., Яковлев О. В.** Исследование угловых погрешностей круговых оптических шкал, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300 // *Оптический журнал*. 2011. **78**, № 6. С. 47–50.
32. **Полецук А. Г.** Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонковой и фоторастровой технологий // *Автометрия*. 1991. № 6. С. 66–76.

Поступила в редакцию 21 июля 2017 г.