

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 534.4 : 621.317

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРООПТИКЕ.

Ч. II. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
С ТРЁХМЕРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ*

А. Г. Полещук¹, В. П. Корольков¹, В. П. Вейко^{1,2},
Р. А. Заколдаев², М. М. Сергеев²

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

²Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики (Университет ИТМО),
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49
E-mail: victork@iae.nsk.su

Представлен обзор исследований, выполненных в области разработки процессов формирования 3D-микрорельефа оптических элементов с применением как прямого лазерного воздействия на различных длинах волн, так и фотолитографических технологий на основе фотошаблонов, изготовленных путём лазерной записи. Рассмотрены типовые характеристики рельефа, ограничения и преимущества, свойственные представленным методам.

Ключевые слова: микрооптика, прямая лазерная запись, полутонная фотолитография, фоторастровый метод, микроплазма.

DOI: 10.15372/AUT20180201

Введение. Задача создания 3D-микроструктур с многоуровневым или кусочно-непрерывным микрорельефом поверхности имеет чрезвычайно большое значение при разработке оптических, микромеханических, акустических, электронных и т. п. устройств и систем. В оптике существует огромная потребность в применении пространственного 3D-микрорельефа для создания рефракционных и дифракционных оптических элементов, таких как линзы Френеля, микролинзовые растры, мультипликаторы лазерных пучков, корректоры аберраций и т. д. Обычные технологии микрообработки поверхности [1], применяемые в микроэлектронике, не предназначены для изготовления микроструктур с многоуровневым и кусочно-непрерывным микрорельефом. Планарная технология, являющаяся ключевой в микроэлектронике, позволяет легко формировать только рельефные бинарные структуры. Методом фотолитографии с использованием комплекта совмещаемых фотошаблонов изготавливаются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) [2]. Однако технологические трудности и погрешности совмещения ограничивают возможности фотолитографии при синтезе ДОЭ с периодом зон в единицы микрон и световым диаметром до сотен миллиметров. Поэтому актуальной задачей является разработка и исследование альтернативных методов синтеза дифракционных и рефракционных микрооптических элементов.

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

Предлагаемая работа — продолжение обзора использования лазерных и оптических технологий в производстве дифракционных и рефракционных элементов микрооптики [3]: анализ результатов исследования применения методов формирования трёхмерного поверхностного микрорельефа, в том числе использующих различные типы фотошаблонов.

Методы формирования фазовой функции микрооптических элементов. Основные методы изготовления микрооптики, разработанные к настоящему времени, приведены на рис. 1. Оптический элемент с функцией пропускания $\dot{a}(x) = \exp[-i\varphi(x, y)]$ может быть изготовлен путём изменения глубины рельефа $h(x, y)$ на поверхности подложки:

$$\varphi_h(x, y) = \frac{2\pi m}{\lambda} [n - n_0]h(x, y). \quad (1)$$

Здесь n_0 и n — коэффициенты преломления окружающей среды и оптического элемента соответственно; $m = 1, 2, 3, \dots$; λ — расчётная длина волны. Другой метод связан с локальным изменением распределения коэффициента преломления $n(x, y)$ материала оптического

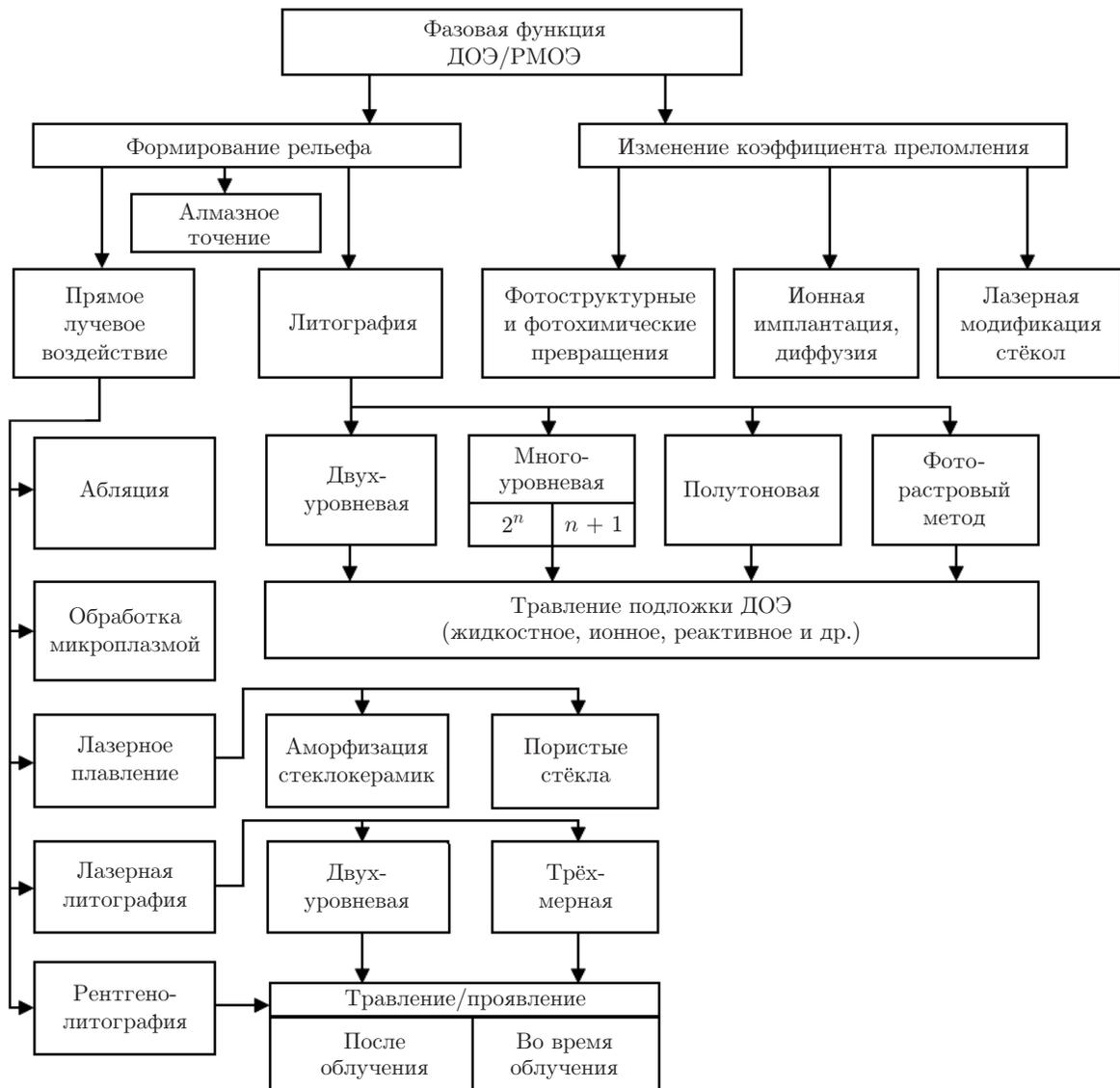


Рис. 1. Методы изготовления дифракционных оптических элементов и градиентных рефракционных микрооптических элементов (РМОЭ)

элемента, осуществляемого, как правило, вблизи поверхности на глубину $h_1(x, y)$:

$$\varphi_n(x, y) = \frac{2\pi t}{\lambda} [n(x, y) - n_1] h_1(x, y), \quad (2)$$

где n_1 — исходный коэффициент преломления материала элемента. Подобный метод широко используется в интегральной и волоконной оптике.

Один из первых методов изготовления фазовых дифракционных структур, реализующий функцию пропускания согласно выражению (1), основывается на отбеливании экспонированных галоидосеребряных фотоматериалов [4]. Относительно недавно была показана возможность формирования рельефа микролинзовых растров на подобных материалах с использованием воздействия коротковолнового УФ-излучения и двухступенчатого отбеливания [5]. Реализация голограмм на основе градиента коэффициента преломления (2) возможна с использованием толстых слоёв халькогенидов [6] либо фотополимеров [7]. В них под воздействием света происходит полимеризация мономеров, приводящая к локальному изменению показателя преломления. Ионная имплантация, диффузия, ионный обмен широко применяются для создания РМОЭ, оптических волноводов и других систем [8]. Модифицирование стёкол сфокусированным фемтосекундным лазерным пучком даёт возможность получения сложных 3D-структур [9]. Однако локальные изменения показателя преломления имеют малую величину (10^{-2} – 10^{-3}), что недостаточно для создания тонкослойных ДОЭ.

Дифракционные оптические элементы и градиентные рефракционные микрооптические элементы с поверхностным микрорельефом получили наибольшее распространение. Так как глубина микрорельефа для видимого диапазона длин волн лежит в пределах 1–2 мкм, толщина ДОЭ определяется только подложкой. Для прецизионных ДОЭ, предназначенных, например, для контроля асферических компонентов, толщина подложки составляет 10–20 мм [10], а для радужных голограмм [11] — менее 0,1 мм. Рассматриваются проекты создания космического телескопа с тонкоплёночным дифракционным объективом диаметром 10 км и толщиной подложки 10 мкм [12]. Основные методы формирования поверхностного микрорельефа — это удаление материала подложки алмазным точением [13], сфокусированным ионным пучком [14] и лазерной абляцией [15]; лучевое воздействие (лазерное, электронное, рентгеновское) на физико-химические свойства материалов с последующей обработкой в жидкостном травителе для формирования рельефа, а также разнообразные методы микролитографии в сочетании с реактивным ионным травлением («сухое» травление).

Прямая лазерная запись (ПЛЗ) сфокусированным излучением лазера (лазерная литография) [16] или пучком электронов [17] по тонким (1,5–2 мкм) плёнкам резистов с последующим переносом рельефа на поверхность механически-прочного материала подложки сухим травлением используется для изготовления высококачественных и высокоэффективных ДОЭ. Скорость записи существенно повышается при использовании пространственных модуляторов света [18]. Лазерно-индуцированное плавление некоторых стёкол [19] и обработка «микроплазмой» [20] также позволяют успешно формировать микрорельеф ДОЭ и РМОЭ. Бурно развивающаяся в настоящее время двухфотонная полимеризация под действием фемтосекундного лазерного излучения является мощным инструментом для формирования трёхмерных микроструктур оптического назначения [21]. Однако общие недостатки этих методов — высокая стоимость и низкая производительность процесса изготовления оптических элементов. Это делает их малоэффективными при серийном производстве по сравнению с тиражированием гальванопластикой, горячей формовкой или тиснением.

Методы фотолитографии, развитые в микроэлектронике, дают возможность тиражировать высокоэффективные ДОЭ. Многоуровневый метод при использовании комплекта из 3–4 фотошаблонов позволяет изготовить ДОЭ с дифракционной эффективностью более 95 % [22]. По своим параметрам такие элементы уже могут конкурировать с элементами классической оптики. Однако возможности данного метода оказываются ограниченными при изготовлении ДОЭ с малым периодом зон [23], так как погрешность совмещения фотошаблонов приводит к падению ДЭ и возрастанию шумов. Изготовить ДОЭ с высокой ДЭ можно с использованием одного полутонового [24] или растрированного [25] фотошаблона. При этом отпадает необходимость в совмещении фотошаблонов, а минимальные размеры фазового профиля ДОЭ определяются только разрешением процесса контактной или проекционной фотолитографии. Простота полутонового и фоторастрового методов в сочетании с высоким качеством формируемых элементов делает их одними из наиболее перспективных методов синтеза ДОЭ.

Далее более подробно рассмотрим методы изготовления элементов микрооптики и проведём сравнение их характеристик, ограничений и типичных областей применения.

Метод прямой лазерной записи по фоторезисту хорошо зарекомендовал себя при изготовлении как непрерывного (гладкого) 3D-микрорельефа дифракционных оптических элементов, рассчитанных таким образом, что в их структуре отсутствуют резкие скачки фазы [26], так и кусочно-непрерывного, типичного для классических дифракционных элементов [27]. Этот метод формирования рельефа включает создание необходимого распределения экспозиции в плёнке фоторезиста путём сканирования сфокусированного пучка по его поверхности и последующее проявление фоторезиста в жидком щелочном проявителе (этапы I–III на рис. 2, *a*).

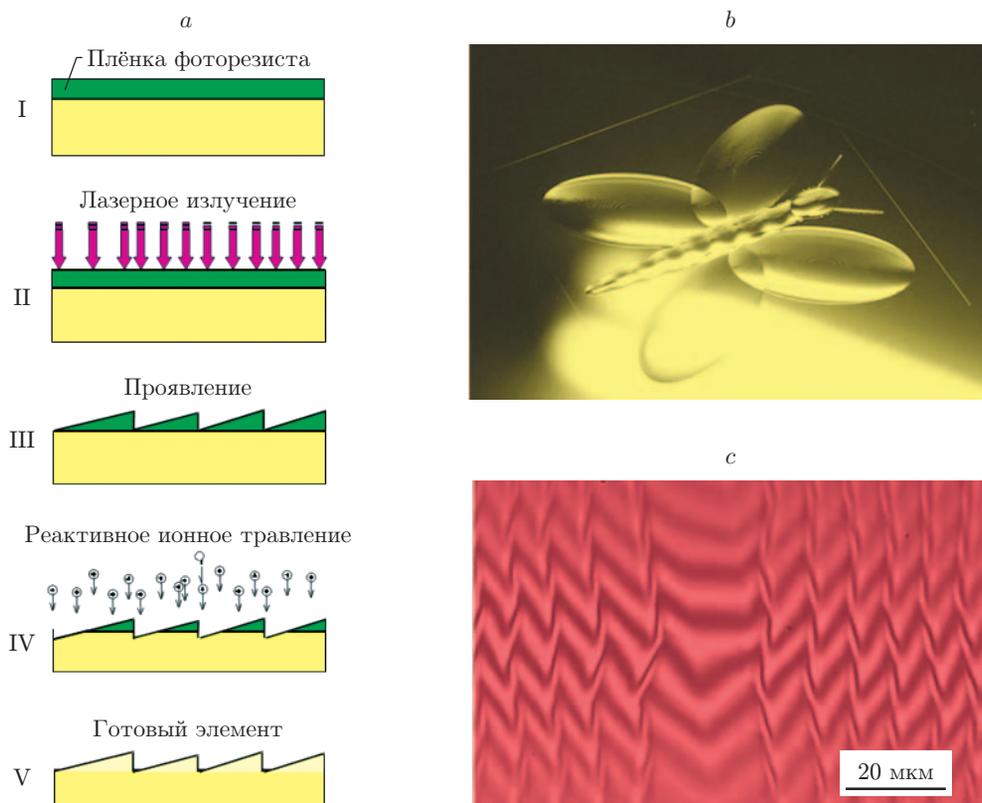


Рис. 2. Прямая лазерная запись: *a* — этапы технологии; *b* — фотография псевдо-объёмного изображения бабочки, воспроизведённого ДОЭ; *c* — микроинтерферограмма его дифракционной структуры

В качестве фоторезистов обычно используют позитивные низкоконтрастные фоторезисты для ближнего УФ-диапазона, например серий S1800 (Shipley, США), AZ1500, AZ6600, AZ9000 (Clariant AG, Швейцария), а также фоторезист ФП-3520/3535 (ФРАСТ-М, Россия). Экспонирование фоторезиста может производиться на актиничной длине волны в диапазоне 300–480 нм. Типичная чувствительность фоторезистов лежит в диапазоне 50–100 мДж/см². Для формирования микрорельефа применяются низкоконтрастные проявители на основе щелочей КОН или NaOH. Одним из преимуществ ПЛЗ является практически линейная зависимость глубины профиля от дозы экспозиции после некоторого порогового значения. Выход на этот участок без потери динамического диапазона управления мощностью лазерного излучения возможен за счёт дополнительного технологического этапа равномерной предэкспозиции, который можно провести, например, на установке контактной фотолитографии. Доза предэкспозиции выбирается так, чтобы после проявления фоторезиста его толщина уменьшилась на 0,2–0,5 мкм. На рис. 2, *b* показано декоративное изображение воспроизведённого ДОО с кусочно-непрерывным микрорельефом (рис. 2, *c*). Структура ДОО была записана сфокусированным пучком лазера (длина волны 405 нм) на плёнке фоторезиста толщиной 2 мкм на установке CLWS-300IAE [28] и после проявления покрыта металлической плёнкой для лучшей визуализации псевдообъёмного изображения.

Для реализации ДОО в оптическом приборостроении необходимо их изготавливать на твёрдых и химически устойчивых подложках (стекло, кварц, кремний и т. д.). Для этого рельеф, сформированный в плёнке фоторезиста, переносится в материал подложки путём реактивного ионного травления (см. рис. 2, *a*) с помощью установок типа PlasmaLab 80 Plus (Oxford Instruments, Великобритания) [29]. Параметры процесса подбираются таким образом, чтобы отношение скоростей травления фоторезиста и материала подложки было около 1 : 1.

Пространственное разрешение ПЛЗ ограничено диаметром записывающего пучка и толщиной плёнки фоторезиста, которые определяют ширину обратного ската. Дифракционная эффективность ДОО с кусочно-непрерывным рельефом, зависящая от этой величины, может быть заметно повышена за счёт оптимизации распределения экспозиции фоторезиста [30], формируемой лазерным пучком, или использования контурной маски [31].

Метод полутоновой фотолитографии основан на прямом экспонировании слоя фоторезиста через полутоновый фотошаблон (ПФ) (рис. 3, *a*). При этом фоторезист обрабатывается так же, как и для ПЛЗ: с предэкспозицией и проявлением в слабоконтрастном щелочном растворе. Экспонирование может осуществляться методом проекционной фотолитографии и методом контактной фотолитографии, которая позволяет получить высокое пространственное разрешение. При использовании бинарных фотошаблонов её предельное пространственное разрешение W зависит от величины зазора Z между фотошаблоном и

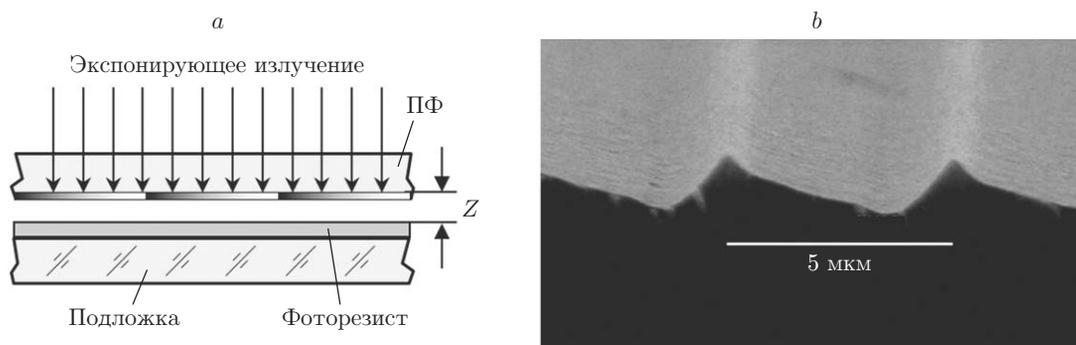


Рис. 3. Полутоновая контактная фотолитография: *a* — схема экспонирования фоторезиста, *b* — пример микро рельефа ДОО, полученного с фотошаблона из LDW-стекла типа I

слоем фоторезиста $W \approx \sqrt{0,7\lambda Z}$, возникающего из-за неидеального контакта (λ — длина волны экспонирующего излучения) [32]. Для зазора 2 мкм разрешаемая ширина линии составляет около 0,8 мкм. Фактически эта линия состоит из двух скатов профиля в разные стороны от центра линии.

В случае полутонного фотошаблона из LDW-стекла, метод лазерной записи которого упоминался в [3], граница между максимальным и минимальным пропусканием фотошаблона получается размытой примерно на величину, равную толщине поглощающего слоя (порядка 1 мкм для LDW-стекла типа I) [33]. В результате пилообразный рельеф в фоторезисте имеет покатые обратные склоны вместо вертикальных (рис. 3, *b*). При этом полная ширина обратного ската в фоторезисте определяется величиной $W/2$, шириной перепада пропускания в ПФ и вкладом неконтрастного проявления фоторезиста. На профиле, показанном на рис. 3, *b*, совместное действие этих факторов привело к образованию обратного ската D шириной 1,5 мкм. Его влияние на дифракционную эффективность ДОЭ может быть оценено с использованием простого выражения $DЭ = (1 - D/T)^2$, где T — период дифракционной структуры [34], при уменьшении которого с 10 до 4 мкм эффективность падает с 81 до 39 %. Таким образом, ниже периода 4 мкм применение ПФ не оправдано, поскольку существенно проще изготовить обычный бинарный фотошаблон. Перенос рельефа из фоторезиста в плавленный кварц с помощью реактивного ионного травления также несколько снижает эффективность. При экспериментальном изготовлении дифракционных линз на кварцевых подложках эффективность структуры с периодом более 40 мкм достигала 95 % и падала до 68 % для периода 8 мкм [35].

Использование ПФ в контактной литографии приводит к возникновению проблемы образования дефектов при многократном копировании. Метод фотолитографии с зазором позволяет устранить образование дефектов, но за счёт ухудшения пространственного разрешения. Можно считать, что применение ПФ оправдано при необходимости изготовления ДОЭ размером более 10 мм при тираже до сотен штук. Для меньших ДОЭ экономически эффективнее фоторастровый метод.

Фоторастровый метод. При формировании кусочно-непрерывного рельефа в фоторезисте вместо дорогого ПФ может использоваться растриваемый фотошаблон (РФ) с двухградационным (бинарным) пропусканием (амплитудным или фазовым) совместно с проекционной оптической системой, которая осуществляет фильтрацию растриваемого изображения. Этот метод был разработан в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН [36] и стал широко применяться при изготовлении микролинзовых растров и других ДОЭ [37, 38]. Растриваемые фотошаблоны изготавливались с помощью круговой лазерной записывающей системы по термохимической технологии на плёнках хрома [3]. Фоторастровый метод позволяет существенно упростить технологию ДОЭ, основанную на стандартном оборудовании для фотолитографии. Бинаризацию исходного полутонного изображения осуществляют путём частотно-импульсной или широтно-импульсной модуляции. Схема экспонирования фоторезиста с помощью проекционной установки показана на рис. 4, *a*. Изображение источника излучения проецируется конденсором через РФ во входной зрачок проекционного объектива. Пространственная частота РФ $f_r = 1/T$ блокируется входным зрачком объектива, и в плоскости плёнки фоторезиста на поверхности заготовки формируется полутонное изображение $t(x, y)$. Ширина d штрихов растриваемого изображения должна меняться вдоль координат x, y по законам $d = T(1 - \sqrt{t(x, y)})$ и $d = T\sqrt{1 - \sqrt{t(x, y)}}$ для одномерного и двумерного РФ.

На рис. 4, *c, d* показаны микроинтерферограмма тестовой фигуры (клин глубиной 1,6 мкм в фоторезисте) и фотография фрагмента ДОЭ (период зон 8 мкм, ДЭ ≈ 80 %), полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для уменьшения влияния

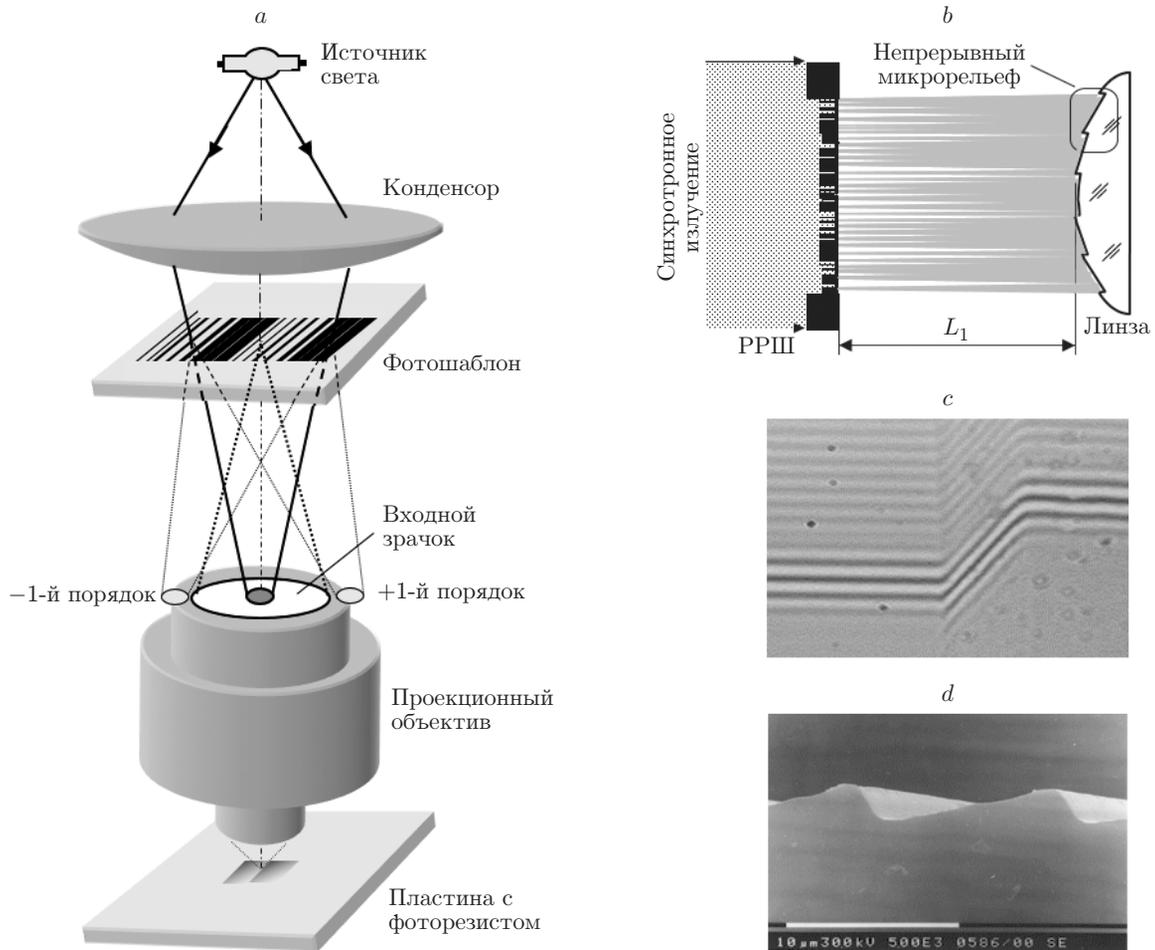


Рис. 4. Фоторастровый метод: *a* — схема установки для проекционного варианта, *b* — реализация РРЛ, *c* — микроинтерферограмма, *d* — пример микрорельефа ДОО, изготовленного проекционным фоторастровым методом

обратного ската, хорошо заметного на рис. 4, *d*, позже было предложено оптимизировать структуру РФ вблизи границ дифракционных зон [39], формируя локальные экстремумы экспозиции.

Для создания трёхмерного микрорельефа большой глубины (>10 мкм) как на плоских, так и выпуклых поверхностях предложен и исследован метод растровой рентгеновской литографии (РРЛ) [40], схема реализации которого приведена на рис. 4, *b*. Растриваемый рентгеновский шаблон (РРШ) освещался синхротронным излучением. Обрабатываемая поверхность устанавливалась на расстоянии $L_1 \approx 40\text{--}60$ мм от РРШ для сглаживания бинарного широтно-импульсного пропуска. Эксперименты продемонстрировали возможность изготовления ДОО с глубиной рельефа до 25 мкм в пластинах ПММА. Доза излучения составляла 2–15 Дж/см². В силу сложности изготовления золотого РРШ и высокой стоимости генерации синхротронного излучения РРЛ не получил широкого распространения.

В последние годы для изготовления конформальных элементов с гладким низкочастотным микрорельефом стала использоваться разновидность фоторастрового метода — полутонная фотолитография с зазором [41]. Зазор между фотошаблоном и слоем фоторезиста применяется для уменьшения паразитной модуляции интенсивности экспонирующего излучения, прошедшего через растриваемый фотошаблон.

Лазерное формирование рефракционных оптических элементов требует управляемого лазерного воздействия на прозрачные в оптическом диапазоне среды, которое может быть осуществлено как напрямую — за счёт использования длин волн лазерного излучения или сверхкоротких длительностей воздействия, обеспечивающих достаточно сильное поглощение в стёклах, так и опосредованно — за счёт локального перевода лазерной энергии в энергию микроплазмы. Рассмотрим сначала первую группу методов.

Большинство оптических материалов, прозрачных в видимом диапазоне, обладает сильным поглощением в дальнем ИК-диапазоне, что позволяет обрабатывать их излучением CO₂-лазеров с длиной волны 10,6 мкм. В процессе формирования оптических элементов при облучении стёкол может происходить локальная деформация, изменение структуры, сглаживание шероховатости поверхности, аморфизация и кристаллизация стеклокерамических материалов, уплотнение и разуплотнение структуры пористых стёкол (ПС) [42], плавление и испарение и другие явления [43].

Лазерно-индуцированные структурно-фазовые превращения в стеклокерамиках. Керамика и стеклокерамика из-за своей поликристаллической структуры практически не используются для изготовления оптических компонентов. Причина заключается в сильном рассеивании оптического излучения такими материалами. Однако при быстром нагревании и охлаждении их можно локально аморфизировать либо кристаллизовать [44]. При этом скорость охлаждения материала должна быть выше скорости кристаллизации вблизи температуры стеклования. Например, при лазерной аморфизации ситалла СТ-50 можно сформировать оптические элементы с высоким пропусканием в видимом диапазоне длин волн [45, 46]. В результате действия сил поверхностного натяжения, а также большего удельного объёма аморфной фазы область аморфизации образует двояковыпуклую линзу, профиль которой близок к сферическому.

Наибольший интерес для лазерной обработки представляют фотоструктурируемые стеклокерамики в исходном аморфном состоянии, поскольку такие материалы широко применяются для изготовления дифракционных оптических элементов, а также узлов микро-системной техники. Например, литий-алюмосиликатные стёкла с добавлением Ce₂O₃ и Ag₂O [47] в исходном аморфном состоянии обладают высоким пропусканием в оптическом диапазоне, которое снижается с формированием кристаллической фазы. Локальная кристаллизация таких стёкол осуществляется с помощью фототермической обработки излучением CO₂-лазера при нагревании выше 450 °С [48, 49].

В других режимах фототермической обработки происходит и аморфизация кристаллической фазы при температуре выше 700 °С [50]. Структура и все свойства материала при этом возвращаются в исходное состояние, что позволяет проводить многократные обратимые структурно-фазовые превращения. Однако вследствие сильного поглощения излучения с длиной волны 10 мкм процессы кристаллизации, так же как и аморфизации, происходят только вблизи облучаемой поверхности.

Структурно-фазовые превращения в объёме фотоструктурируемого стекла осуществимы при двухдлинноволновой лазерной обработке. В этом случае ультракороткими лазерными импульсами видимой или близкой ИК-области создаются области затравочной кристаллизации с изменёнными оптическими свойствами (рис. 5, *a, b*), а полная кристаллизация в таких областях происходит в результате фототермического воздействия излучения CO₂-лазера (рис. 5, *c, d*) [51, 52]. Данный подход значительно сокращает длительность кристаллизации (с 6–8 ч в печи до 10–25 мин) и даёт возможность корректировать размеры, форму и состав кристаллической фазы в процессе её создания. Последнее крайне важно, поскольку позволяет формировать области с различными спектральными и структурными свойствами. Варьирование режимами фототермической обработки способствует созданию кристаллизованных областей с различной степенью растворения в водных растворах плавиковой кислоты, что перспективно при изготовлении систем микрофлюидики.

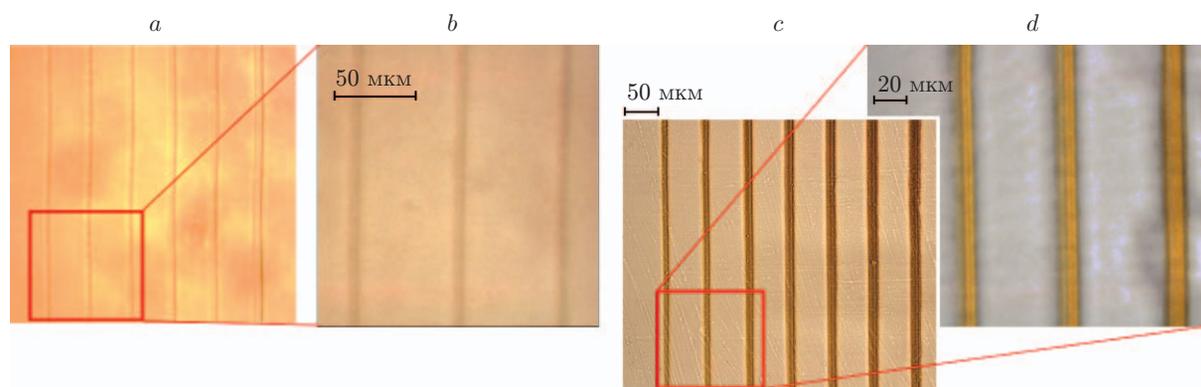


Рис. 5. Лазерно-индуцированная модификация в объёме стекла: *a, b* — после облучения на этапе I ультракороткими лазерными импульсами; *c, d* — после кристаллизации модифицированных областей излучением CO_2 -лазера

Изменение плотности пористых стёкол лазерным воздействием. Другим примером лазерной обработки оптических материалов, при которой изменение их структуры и формирование профиля поверхности в равной степени определяют оптические свойства изготавливаемого элемента, является денсификация ПС. Изменения показателя преломления в этом случае можно добиться термоуплотнением пористого стекла при его лазерном воздействии [53–56]. Пористые стёкла представляют собой кремнезёмный каркас (более 92 % SiO_2) с размером пор 0,1–200 нм, пористостью 15–70 % и показателем преломления от 1,15 до 1,45 [57, 58].

Формирование оптических элементов в ПС при нагреве излучением CO_2 -лазера происходит за счёт его локального термоуплотнения при температуре выше 700°C , что приводит к усадке кремнезёмного каркаса и, как следствие, увеличению плотности и показателя преломления, который при полном спекании достигает величины 1,46 (рис. 6, *a*). После лазерного воздействия эта область представляет собой выпукло-вогнутую линзу с отрицательным фокусным расстоянием. Положительный оптический элемент на пористом стекле можно получить при частичном удалении шлифовкой термически уплотнённой области образца. В результате происходит коррекция формы поверхности и толщины термоуплотнённой области [56]. Оптические характеристики таких элементов определяются формой зрачка в виде области термоуплотнения (сферическая, эллиптическая, цилиндрическая), геометрией профиля преломляющей поверхности (сферическая, асферическая), разницей показателей преломления термоуплотнённой области и ПС, градиентом показателя преломления, заданным как в самой области, так и в её окрестности.

Путём термоуплотнения поверхности микропористого стекла (размер пор до 50 нм) изготовлены оптические элементы с линейными размерами $L = 0,15\text{--}3,0$ мм и числовой апертурой NA до 0,25, где $NA = L/(2F)$ (F — фокусное расстояние области) [55]. Формирование оптических элементов на макропористом стекле (размер пор от 50 до 200 нм) позволяет достигать $NA = 0,35$. Данные оптические элементы и их массивы могут использоваться для коррекции и коллимации излучения полупроводниковых лазеров. Увеличения NA до 0,5 можно достичь при усложнении конструкции оптических элементов и создании двухкомпонентных систем [55, 59].

Однако развитие микросистемной техники, например, в фотонике, микро- и оптофлюидике требует изготовления 3D-структур в объёме прозрачных материалов. Лазерное излучение, интенсивно поглощаемое средой с поверхности, не может быть использовано в качестве инструмента для создания таких структур. Решением проблемы становится применение фемтосекундных лазерных импульсов в диапазоне частот их следования от килогерц

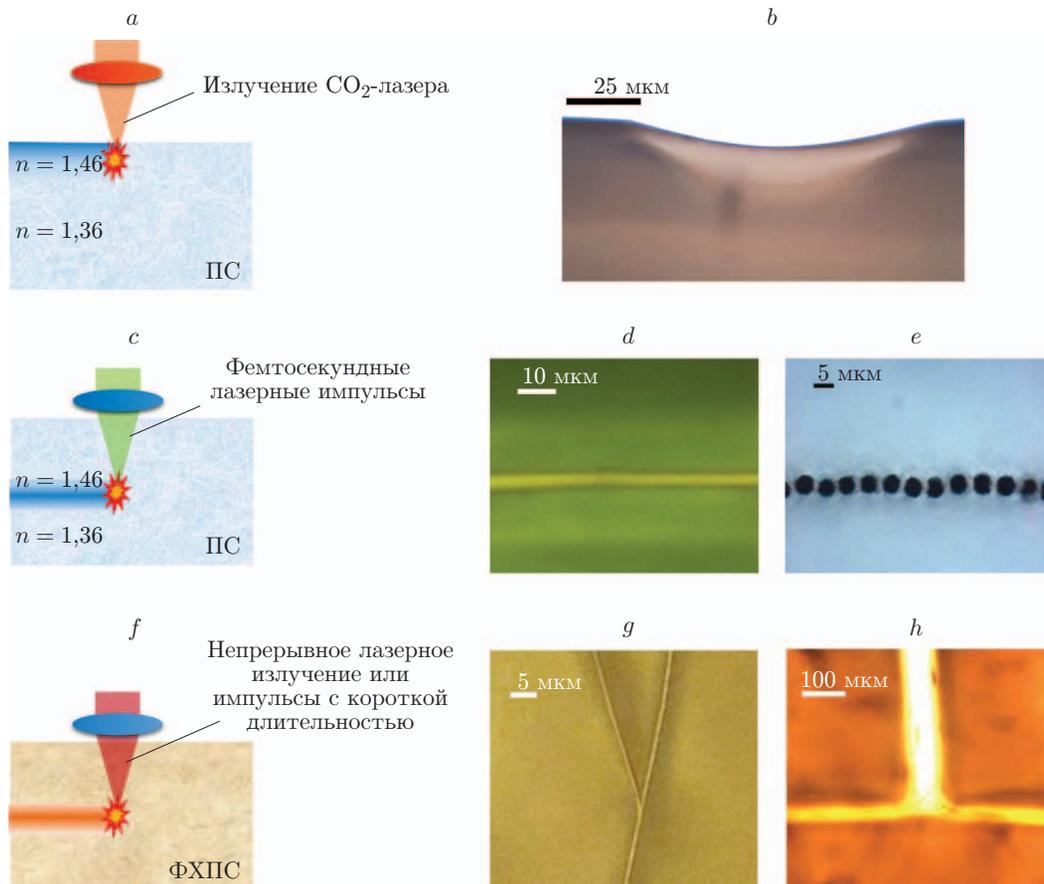


Рис. 6. Формирование оптических элементов изменением плотности пористых стёкол под лазерным воздействием: *a, c, f* — схематические изображения процессов; внешний вид элементов: *b* — торец планарного волновода, *d* — объёмный волновод, *e* — разуплотнение стекла, *g, h* — области модификации произвольной формы в объёме фотохромного пористого стекла (ФХПС), содержащего соли серебра различной концентрации

до мегагерц (рис. 6, *c—e*). Модификация структуры стекла в данном случае возникает только в пределах перетяжки лазерного пучка в объёме материала за счёт многофотонного поглощения в среде [60]. В результате лазерного воздействия происходит локальное уплотнение (или разуплотнение в зависимости от режимов облучения) структуры [61]. При этом плотность энергии в импульсе с длительностью 250 фс и частотой следования 500 кГц варьируется от 4,2 до 24,4 Дж/см². При схожих режимах лазерной обработки пористых стёкол также происходит формирование нанорешёток и наноканалов [61–63].

Другим способом лазерной модификации структуры в объёме пористого стекла является повышение поглощательной способности путём его пропитки оксидами и солями металлов, наночастицами, в том числе органическими соединениями [64] (рис. 6, *f—h*). Вещество, частично заполняющее каналы ПС, выполняет функцию центров поглощения при воздействии лазерным излучением, для которого силикатная матрица прозрачна [65, 66]. Отличительная особенность таких нанокомпозитов — относительно свободное расположение частиц в силикатной матрице, что значительно ускоряет диффузионные процессы, участвующие в модификации структуры при облучении. Изготовление оптических компонентов в этом случае может быть осуществлено при воздействии наносекундного или непрерывного лазерного излучения. Например, лазерная обработка ФХПС позволяет создавать области модификации, состоящие из центральной и краевой частей с различным содержанием солей и наночастиц серебра [67]. Формирование подобных областей основа-

но на теплофизических процессах уплотнения стекла и концентрационной диффузии при организации наночастиц в каналах пористого стекла.

Обработка материалов лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП).

Если не требуется предельно высокая пространственная частота ДОО, то такие элементы могут изготавливаться с помощью лазерной плазмы, образующейся на границе раздела обрабатываемой прозрачной среды и сильнопоглощающей мишени (рис. 7, *a*) [68]. Вырожденный в горячее пятно при плотном контакте двух сред лазерный факел — ЛИМП — представляет собой высокоточный инструмент прямой обработки поверхности прозрачных материалов. Параметры лазерной микроплазмы: температура и давление, размер пятна на поверхности и его положение в пространстве — определяются характеристиками лазерного излучения и положением фокуса лазерного пучка. Источник лазерного излучения выбирается с учётом следующих факторов:

— длина волны излучения должна лежать в области прозрачности обрабатываемого материала, чтобы излучение проходило сквозь него, и максимально поглощаться мишенью, что необходимо для эффективного преобразования энергии лазерного излучения в энергию плазмы;

— плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени должна быть достаточной для образования плазмы с температурой и давлением, обеспечивающими ионное травление обрабатываемого плазмой материала, для чего в большинстве случаев используют наносекундные лазерные импульсы.

Эффективность преобразования энергии лазерного излучения в энергию плазмы при воздействии на поверхность мишени является ключевым фактором технологии. При обработке прозрачных материалов методом ЛИМП высокая эффективность преобразования, близкая к 100 %, обеспечивается использованием в качестве мишени абсолютно чёрного тела. Примером такой мишени могут служить углеродные материалы с низким коэффициентом отражения и малыми тепловыми потерями при короткой длительности воздействия.

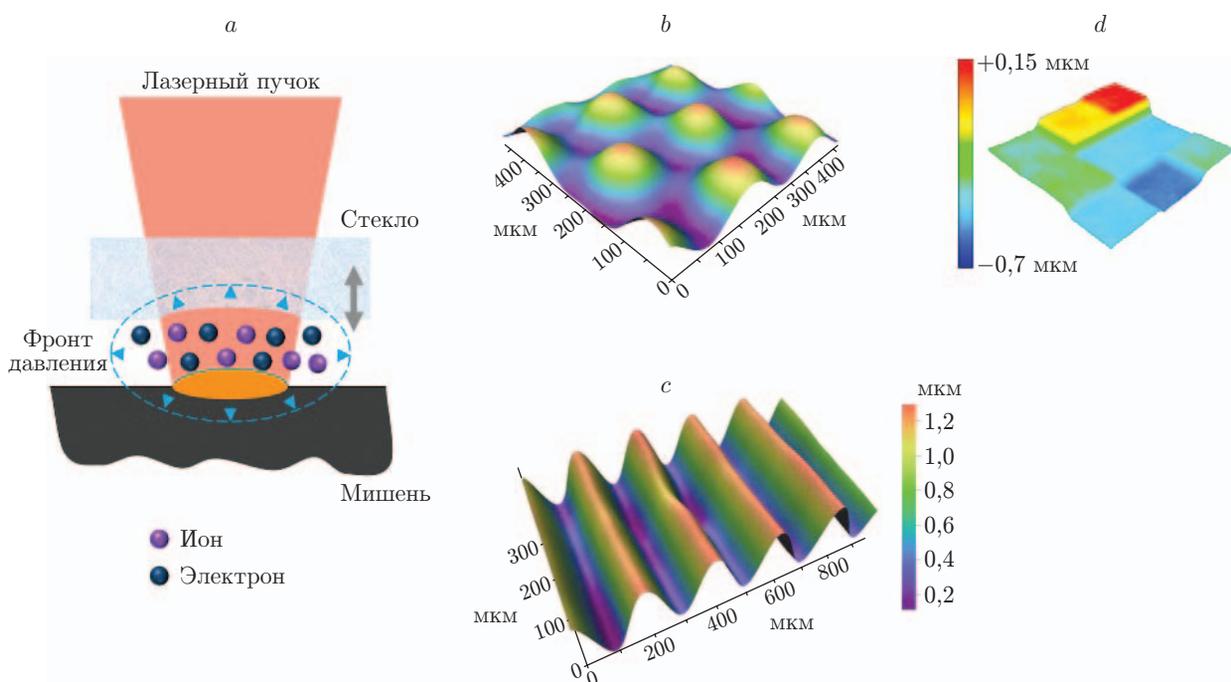


Рис. 7. Методы обработки стекла ЛИМП: *a* — схематическое изображение; *b* — формируемые микрооптические элементы — массив микролинз; *c* — фазовая решётка; *d* — многоуровневая случайная фазовая пластина

В свою очередь, энергия микроплазмы как субстанции тяжёлых частиц (атомов и ионов) с минимальными потерями затрачивается на нагрев и ионную бомбардировку поверхности обрабатываемого материала. Углеродная микроплазма, формируемая наносекундными импульсами волоконного лазера, обладает высокой температурой компонентов (более 14000 К), большим временем жизни (до 20 мс), а также создаёт высокое давление (1 ГПа). В итоге эффективность передачи энергии от лазерного излучения ближнего ИК-диапазона к прозрачному материалу достигает 90 %. В качестве источника излучения для обработки прозрачных материалов может быть использован волоконный Yb-лазер с длиной волны излучения 1,07 мкм, длительностью импульсов 50–200 нс, частотой их следования 20–70 кГц и средней мощностью излучения до 20 Вт. Время действия на материал ЛИМП определяется наносекундной длительностью импульсов и немного превышает её.

В процессе воздействия микроплазмы на оптический материал происходит его нагрев и ионная бомбардировка обрабатываемой поверхности с последующим образованием микро рельефа. При этом положение и характеристики микроплазмы, включая её время жизни, достаточно точно управляются параметрами лазерного излучения. Пространственные характеристики лазерного излучения, такие как диаметр и длина перетяжки пучка, а также положение относительно поверхности мишени влияют на характер формируемой микроплазмы. С помощью ЛИМП на кварцевом стекле возможно изготовление массивов микролинз диаметром от 80 до 300 мкм, числовой апертурой от 0,075 до 0,004, стрелкой прогиба до 1–2 мкм, радиусом кривизны до 3 мм (рис. 7, *b*) [69, 70]. Фазовые дифракционные решётки с прямоугольным и синусоидальным профилями изготавливаются таким способом при сканировании лазерного пучка по прямолинейной траектории (рис. 7, *c*). Период решёток варьируется в диапазоне 25–200 мкм и может плавно изменяться в зависимости от способа сканирования. Высота рельефа может задаваться в диапазоне 0,2–5,0 мкм с шагом 60 ± 10 нм. Так же могут быть изготовлены многоуровневые (до пяти уровней) ДОО оптического качества, что успешно применяется для записи случайных фазовых пластин с бинарной и дискретной структурами (рис. 7, *d*). Такие элементы используются для гомогенизации лазерных пучков высокой мощности. Размер фазового минимального элемента (пиксела) лежит в пределах 250–350 мкм.

Способ обработки прозрачных материалов ЛИМП открывает новые возможности для эффективного создания различных микрооптических компонентов во многих приложениях фотоники, в частности, для создания пассивных преобразователей профиля лазерных пучков. В среднем время формирования массива микролинз на кварцевом стекле с внешними размерами массива 10×10 мм и размером одиночной микролинзы 100 мкм составляет 10–15 минут.

Сравнение технологий формирования 3D-микрорельефа. Рассмотрим основные достоинства и недостатки разработанных технологий, а также оптимальные области их применения.

Полутоновая фотолитография имеет следующие достоинства:

- низкая стоимость покрытия в пересчёте на одну пластину;
- практически линейная зависимость глубины от дозы экспозиции при использовании предэкспозиции;
- возможность использования дешёвых УФ-источников для экспонирования;
- возможность формирования произвольного рельефа.

В то же время у неё есть недостатки:

- зависимость глубины рельефа от температур сушки и проявления;
- зависимость ширины обратного ската от зазора;
- необходимость использования реактивного ионного травления для переноса рельефа в подложку;

— невозможность центрифугированием покрывать фоторезистом большие тяжёлые подложки.

Фоторастровый метод имеет практически те же достоинства и недостатки, что и полутонная фотолитография, но есть и специфические недостатки:

- зависимость ширины обратного ската от глубины фокуса проекционного объектива;
- световое поле проекционных объективов составляет 10–20 мм, что накладывает ограничение на размер изготавливаемого ДОЭ.

Эти две технологии применяют стандартное фотолитографическое оборудование и могут обеспечить как мелкосерийное, так и достаточно массовое производство, хотя существенно более дорогое, чем репликация полимерной микрооптики.

Из методов, использующих сканирование лазерного пучка, наиболее универсальным с точки зрения возможности реализации типов структур ДОЭ и РМОЭ является метод ПЛЗ на фоторезисте. По достоинствам он близок к полутонной фотолитографии. Разница состоит в том, что в качестве источника света для него можно использовать относительно дешёвые ультрафиолетовые диодные лазеры. К его специфическим недостаткам отнесём ограниченность глубины формируемого рельефа величиной около 10 мкм при числовой апертуре микрообъектива 0,65. При этом ширина обратного ската равна 1–2 размера записывающего пучка. Очевидно, что ПЛЗ требует дорогостоящего технологического оборудования для прецизионной сканирующей лазерной записи.

Методы, использующие высокоинтенсивное непрерывное (CO_2 -лазер) и импульсное лазерное воздействие, отличаются более низкой разрешающей способностью по сравнению с ПЛЗ. Однако этот недостаток превращается в достоинство при необходимости формирования рефракционных микрооптических элементов. Кроме того, данные методы позволяют итерационно проводить коррекцию оптических свойств формируемого элемента после пробных испытаний, что совершенно невозможно в случае переноса рельефа из фоторезиста в подложку после прямой лазерной записи и фотолитографических методов.

В ряду сравниваемых методов формирования оптических элементов с 3D-микрорельефом с помощью высокоинтенсивного лазерного излучения особо выделяется метод обработки материалов лазерно-индуцированной микроплазмой. К его достоинствам относится высокая эффективность преобразования энергии лазерного ИК-излучения в энергию микроплазмы, практически полностью поглощаемую стеклом. Управление глубиной формируемого элемента на поверхности заготовок из плавленого кварца может проводиться в диапазоне от 0,15 до 7 мкм с шагом дискретизации 60 ± 20 нм.

В настоящее время все упомянутые выше лазерные методы могут быть отнесены скорее к штучному заказному и мелкосерийному производству из-за достаточно низкой производительности оборудования.

Заключение. На начальном этапе развития микрооптики для её изготовления использовались в основном технологии и оборудование, пришедшие из микроэлектронной промышленности. Затем был разработан широкий спектр технологий, ориентированных на определённые классы рефракционных и дифракционных элементов с микрорельефом. Необходимость специализированных технологий вызвана специфическими требованиями микрооптики, такими как необходимость формирования трёхмерного рельефа в оптически прозрачной подложке, низкие потери на светорассеяние, формирование микрорельефа на криволинейных поверхностях. Существенный вклад в развитие этих технологий внесли Институт автоматики и электрометрии СО РАН и Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО).

Как видно из представленного обзора, ни один из разработанных методов не является универсальным. Разнообразные прикладные задачи ставят зачастую диаметрально противоположные требования. Поэтому создание новых лазерных технологий по-прежнему

актуально, особенно в связи с появлением новых лазерных источников сверхкоротких импульсов с длиной волны от УФ- до ИК-спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mahalik N. P.** *Micromanufacturing and Nanotechnology*. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 468 p.
2. **Swanson G. J., Veldkamp W. B.** Diffractive optical elements for use in infrared system // *Opt. Eng.* 1989. **28**, N 6. P. 605–608.
3. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. и др.** Лазерные технологии в микрооптике. Ч. I. Изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием // *Автометрия*. 2017. **53**, № 5. С. 66–77.
4. **Bryndahl O.** Formation of blazed grating // *JOSA*. 1970. **60**, N 1. P. 140–145.
5. **Гуляев С. Н., Ратушный В. П.** Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании // *Оптический журнал*. 2003. **70**, № 2. С. 45–49.
6. **Коронкевич В. П., Ремесник В. Г., Фатеев В. А., Цукерман В. Г.** Киноформные оптические элементы в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников // *Автометрия*. 1976. № 5. С. 3–9.
7. **Герасимова Т. Н., Константинова А. В., Пен Е. Ф. и др.** Исследование голографических характеристик при записи объемных фазовых голограмм в фотополимерном материале // *Автометрия*. 1993. № 4. С. 23–30.
8. **Подсвилов О. А., Сидоров А. И., Чураев Д. В.** Особенности формирования оптических волноводов в силикатном стекле при высокой энергии и дозе электронного облучения // *Журнал технической физики*. 2014. **84**, вып. 11. С. 96–100.
9. **Davis K. M., Miura K., Sugimoto N., Hirao K.** Writing waveguides in glass with a femtosecond laser // *Opt. Lett.* 1996. **21**, N 21. P. 1729–1731.
10. **Полещук А. Г., Маточкин А. Е.** Лазерные методы контроля асферической оптики // *Фотоника*. 2011. № 2. С. 38–44.
11. **Lee R. A.** *Micromanufacturing for document security: Optically variable devices* // *Micromanufacturing and Nanotechnology* /Ed. N. P. Mahalik. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. P. 131–169.
12. **Barton I. M., Britten J. A., Dixit Sh. N. et al.** Fabrication of large-aperture lightweight diffractive lenses for use in space // *Appl. Opt.* 2001. **40**, N 4. P. 447–451.
13. **Белозеров А., Ларионов Н., Лукин А., Мельников А.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. I // *Фотоника*. 2014. **46**, № 4. С. 12–32.
14. **Fu Y.** Integration of microdiffractive lens with continuous relief with vertical-cavity surface-emitting lasers using focused ion beam direct milling // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2001. **13**, N 5. P. 424–426.
15. **Баля В. К.** Создание плёночной микрооптики методом лазерной абляции полимерных материалов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. С.-Пб., 2014. 19 с.
16. **Gale M. T., Rossi M.** Fabrication of continuous relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresist // *Opt. Eng.* 1994. **33**, N 11. P. 3556–3566.
17. **Wang M.** *Lithography*. InTech, Chapters Published, 2010. 678 p.
18. **Kessels M. M., El Bouz M., Pagan R., Heggarty K. J.** Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct write of binary and multilevel microstructures // *Journ. Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*. 2007. **6**, N 3. 033002.

19. Вейко В. П., Костюк Г. К., Чуйко В. А., Яковлев Е. Б. Лазерное локальное спекание пористых оптических сред // Ионные расплавы и твердые электролиты. 1988. **3**. С. 81–85.
20. Veiko V., Volkov S. A., Zakoldaev R. A. et al. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // Quant. Electron. 2017. **47**, N 9. P. 842–848.
21. Ostendorf A., Chichkov B. N. Two-photon polymerization: A new approach to micro-machining // Photon. Spectra. 2006. **40**, N 10. P. 72–80.
22. Спектор Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия. 1985. № 6. С. 34–38.
23. Полещук А. Г. Изготовление рельефно-фазовых структур с непрерывным и многоуровневым профилем для дифракционной оптики // Автометрия. 1992. № 1. С. 66–79.
24. Гочияев В. З., Корольков В. П., Соколов А. П., Чернухин В. П. Полутоновая оптическая запись на пленках a-Si // Квантовая электроника. 1989. **16**, № 11. С. 2343–2348.
25. Полещук А. Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий // Автометрия. 1991. № 3. С. 66–76.
26. Gale M. T., Knop K. The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing // Proc. SPIE. 1983. **0398**. P. 347–353.
27. Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J., Korolkov V. P. Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry // Proc. SPIE. 2002. **4900**. P. 873–884.
28. Korolkov V. P., Poleshchuk A. G. Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements // Proc. SPIE. 2007. **6732**. 67320X.
29. Plasmalab 80 Plus. URL: <http://www.oxfordplasma.de/systems/80plus.htm> (дата обращения: 19.10.2017).
30. Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Shimansky R. V. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 2006. **45**, N 1. P. 53–62.
31. Корольков В. П. Чувствительность оптимизированного метода контурной маски к ошибкам процесса изготовления ДОЭ с кусочно-непрерывным рельефом // Автометрия. 2014. **50**, № 1. С. 9–19.
32. Моро У. Микролитография. М.: Мир, 1990. Ч. 1. 605 с.; Ч. 2. 632 с.
33. Korolkov V. P., Malyshev A. I., Poleshchuk A. G. et al. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW glass // Proc. SPIE. 2001. **4440**. P. 73–85.
34. Hessler T., Rossi M., Kunz R. E., Gale M. T. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 1998. **37**, N 19. P. 4069–4079.
35. Корольков В. П., Малышев А. И., Никитин В. Г. и др. Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекол // Автометрия. 1998. № 6. С. 27–37.
36. Полещук А. Г. Фоторастровый метод синтеза киноформов для лазерной техники // Тр. V Всесоюз. конф. «Оптика лазеров». Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1987. С. 270.
37. Oppliger Y., Sixt P., Stauffer J. M. et al. One-step 3D shaping using a grey-tone mask for optical and microelectronics application // Microelectron. Eng. 1994. **23**, N 1–4. P. 449–454.
38. O’Shea D. C., Rockward W. S. Grayscale masks for diffractive optics: Spatial filtered halftone screens // OSA Technical Digest Ser.: Diffractive Optics. 1994. **11**. P. 119–121.
39. Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Sametov A. R., Suhii S. A. Optimization of half-tone technology for diffractive microlens fabrication // Proc. SPIE. 2011. **7957**. 795710.
40. Cherkashin V., Chen Zh., Krasnoperova A. A. et al. A new application for X-ray lithography: Fabrication of blazed diffractive elements with a deep phase profile // Proc. SPIE. 1996. **2723**. P. 261–267.

41. **Корольков В. П., Насыров Р. К., Полецук А. Г. и др.** Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах YAG:Nd³⁺ // Квантовая электроника. 2013. **43**, № 2. С. 117–121.
42. **Veiko V. P.** Laser technology of microoptical components with gradient refraction index "n" // Proc. SPIE. 1990. **1352**. P. 1–6.
43. **Вейко В. П., Яковлев Е. Б.** Роль модификации структуры материалов и изменения формы поверхности при изготовлении оптических элементов на базе лазерных технологий // Оптический журнал. 1998. **65**, № 10. С. 92–96.
44. **Вейко В. П., Яковлев Е. Б., Шахно Е. А.** Физические механизмы быстрой структурной модификации стеклокерамики при воздействии излучения CO₂-лазера // Квантовая электроника. 2009. **39**, № 2. С. 185–190.
45. **Skiba P. A., Volkov V. P., Predko K. G., Veiko V. P.** Laser-stimulated local change of glass-ceramic optical properties // Opt. Eng. 1994. **33**, N 11. P. 3572–3577.
46. **Veiko V. P., Kieu Q. K., Nikonorov N. V. et al.** Laser-induced modification of glass-ceramics microstructure and applications // Appl. Surface Sci. 2005. **248**, N 1. P. 231–237.
47. **Stookey S.** Chemical machining of photosensitive glass // Ind. Eng. Chem. 1953. **45**, N 1. P. 115–118.
48. **Veiko V. P., Kieu Q. K., Nikonorov N. V.** Laser modification of glass-ceramics structure and properties: A new view to traditional materials // Proc. of the 5th Intern. Symp. on Laser Precision Microfabrication. 2004. Vol. 5662. P. 119–129.
49. **Veiko V., Ageev E., Sergeev M. et al.** Photosensitive glass modification based on infrared CO₂-laser irradiation // Journ. Laser Micro/Nanoeng. 2013. **8**, N 2. P. 155–160.
50. **Sergeev M. M., Veiko V. P., Savochkin D. A. et al.** Reversible phase-structure modification of photostructurable glass ceramic by CO₂-laser irradiation // Appl. Phys. A. 2016. **122**, N 10. P. 1–8.
51. **Sergeev M. M., Veiko V. P., Savochkin D. A., Zakoldaev R. A.** Fast 3D laser-induced reversible phase-structure modification of photostructurable glass // Opt. Quant. Electron. 2016. **48**, N 6. P. 1–12.
52. **Sergeev M. M., Veiko V. P., Tiguntseva E. Y., Olekhovich R. O.** Picosecond laser fabrication of microchannels inside Foturan glass at CO₂ laser irradiation and following etching // Opt. Quant. Electron. 2016. **48**, N 11. P. 1–10.
53. **Вейко В. П., Костюк Г. К., Мешковский И. К. и др.** Микрооптические элементы на основе локальной модификации структуры пористых стекол // Квантовая электроника. 1986. **13**, № 8. С. 1693–1696.
54. **Veiko V. P., Iakoviev E. B., Kostjuk G. K. et al.** New technology of optical components based on local laser thermoconsolidation of porous glasses and coats // Proc. SPIE. 1990. **1328**. P. 201–205.
55. **Veiko V. P., Jakovlev E. B., Nikiphorov A. J.** Laser methods of control of porous silica glass structure // Chemical Processing of Advanced Materials /Eds. L. L. Hench, K. J. West. N. Y.: John Wiley and Sons, 1992. P. 919–931.
56. **Вейко В. П., Костюк Г. К., Чуйко В. А. и др.** Планарные микрооптические элементы на основе локальной модификации структуры пористого стекла // Оптический журнал. 1992. № 2. С. 54–58.
57. **Antropova T. V., Drozdova I. A., Yastrebov S. G., Evstrapov A. A.** Porous glass: Inhomogeneities and light transmission // Opt. Applicata. 2000. **XXX**, N 4. P. 553–568.
58. **Яковлев Е. Б.** Особенности поведения стекол и стеклообразных материалов при быстром нагревании. С.-Пб.: СПб ГУ ИТМО, 2004. 88 с.

59. **Petrov D. V., Dyukareva A. S., Antropova T. V. et al.** Surface sintering of porous glass plates under laser radiation // *Glass Phys. Chem.* 2003. **29**, N 5. P. 456–460.
60. **Musgraves J. D., Richardson K., Jain H.** Laser-induced structural modification, its mechanisms, and applications in glassy optical materials // *Opt. Mater. Express.* 2011. **1**, N 5. P. 921–935.
61. **Veiko V. P., Kudryashov S., Sergeev M. M., Anfimova I. N.** Femtosecond laser-induced stress-free ultra-densification inside porous glass // *Laser Phys. Lett.* 2016. **13**, N 5. 055901.
62. **Liao Y., Cheng Y., Liu C. et al.** Direct laser writing of sub-50 nm nanofluidic channels buried in glass for three-dimensional micro-nanofluidic integration // *Lab Chip.* 2013. **13**, N 8. P. 1626–1631.
63. **Liao Y., Cheng Y.** Femtosecond laser 3D fabrication in porous glass for micro- and nanofluidic applications // *Micromachines.* 2014. **5**, N 4. P. 1106–1134.
64. **Заколдаев Р. А., Сергеев М. М., Костюк Г. К., Яковлев Е. Б.** Лазерное формирование волноводных структур в объёме пластин пористого стекла, пропитанного водным раствором глицерина // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2014. **57**, № 6. С. 41–46.
65. **Сергеев М. М., Костюк Г. К.** Лазерно-индуцированное формирование модифицированных областей протяжённой формы в объёме пористого стекла, импрегнированного солями серебра // *Стекло и керамика.* 2014. № 4. С. 7–13.
66. **Veiko V. P., Sergeev M. M., Kostyuk G. K.** 3D laser structure modification of photochromic nanocomposites based on porous glass // *Journ. Laser Micro/Nanoeng.* 2015. **10**, N 1. P. 20–23.
67. **Костюк Г. К., Сергеев М. М., Гирсова М. А. и др.** Локальное лазерно-индуцированное изменение спектральных свойств в объёме фотохромных пористых силикатных стёкол, легированных галогенидами серебра и меди // *Физика и химия стекла.* 2014. **40**, № 4. P. 551–557.
68. **Вейко В. П., Волков С. А., Заколдаев Р. А. и др.** Лазерно-индуцированная микроплазма как инструмент микроструктурирования прозрачных сред // *Квантовая электроника.* 2017. **47**, № 9. С. 842–848.
69. **Kostyuk G. K., Zakoldaev R. A., Sergeev M. M., Yakovlev E. B.** Microlens array fabrication on fused silica influenced by NIR laser // *Appl. Phys. B.* 2016. **122**, N 4. P. 1–8.
70. **Kostyuk G. K., Zakoldaev R. A., Sergeev M. M., Veiko V. P.** Laser-induced glass surface structuring by LIBBH technology // *Opt. Quant. Electron.* 2016. **48**, N 4. P. 1–8.

Поступила в редакцию 19 октября 2017 г.
