

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 6

1998

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 535.4 : 621.317

В. П. Коронкевич, В. П. Корольков, А. Г. Полещук
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКЕ

Представлен обзор работ по созданию оборудования и технологий изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с бинарным, многоуровневым и непрерывным профилем, выполненных в лаборатории лазерных технологий Института автоматики и электрометрии СО РАН. Запись дифракционных структур осуществлялась в полярной системе координат круговыми лазерными записывающими системами воздействием на регистрирующий материал сфокусированного до размера 0,8 мкм лазерного пучка. В качестве регистрирующих материалов использовались тонкие пленки металлов, полупроводников, резистов или специальных поверхностно-модифицированных стекол, предназначенных для прямой лазерной записи (LDW-стекла). Изготовлены ДОЭ, которые воспроизводят синтезируемый волновой фронт с погрешностью менее $\lambda/20$. Приведены примеры применения новых элементов.

Введение. Изготовление дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с микрорельефом сложной топологии основывается на применении современных фотолитографических технологий. Многие методы, которые в свое время революционизировали микроэлектронику, теперь с успехом используются для изготовления оптики с поверхностным микрорельефом. Электронно-лучевая литография и сухое травление широко применяются для синтеза дифракционных компонентов. Поэлементная лазерная запись дифракционного рисунка в фоторезисте, осуществляемая на современных лазерных генераторах изображений, дает возможность получать матрицы элементов. Дальнейшее тиражирование готового изделия обеспечивается методами фотолитографии, гальванопластики, фотополимеризации, инжекционного литья под давлением и т. д.

Дифракционная оптика не конкурирует с традиционной оптикой. Как и большинство перспективных технологий, она предоставляет новые возможности улучшения качества изображения, сокращения числа компонентов в оптической системе, снижения массы прибора и его цены. Одно из основных ее достоинств – существенное расширение спектра применений оптики в системах массового потребления, к которым относятся оптические линии связи, различные датчики, кассовые аппараты, принтеры, устройства для

чтения товарного кода, знаки защиты денег, товаров и ценных бумаг, лазерные трепанирующие инструменты и др.

В последние годы появилось несколько новых направлений в дифракционной оптике, которые позволят совершить качественный скачок в управлении светом. Одно из них – создание ДОЭ, работающих в резонансной области [1]. Характерные размеры их микроструктуры для видимой области спектра составляют $< 0,25\text{--}0,4$ мкм. Такие дифракционные элементы могут управлять всеми компонентами оптического излучения (амплитудой, фазой и поляризацией) и имеют высокую дифракционную эффективность. Они пригодны для параллельных оптических процессоров, кодирующих и шифрующих устройств, многоканальных систем оптической связи. Другое перспективное направление – синтез ДОЭ с глубоким рельефом [2]. В этом случае оптические элементы совмещают в себе достоинства классической (рефракционной) оптики (ахроматичность) с гибкостью дифракционной. ДОЭ с глубоким рельефом позволяют фокусировать и преобразовывать обычный «белый» свет. Микроструктура таких ДОЭ должна иметь рельеф оптической поверхности с плавно изменяющейся высотой в диапазоне от нуля до десятков микрон. Третье направление – ДОЭ на выгнутых или вогнутых поверхностях вращения [3]. Такие элементы позволяют создать принципиально новую оптику лазерных систем, оптических и рентгеновских телескопов и систем многоканальной связи.

Изготовление дифракционных микроструктур – сложная техническая задача. В настоящее время известно несколько основных методов изготовления ДОЭ: оптические (интерференционные или голографические), алмазное точение, запись сканирующим пучком (электронным или лазерным). Оптические методы [4, 5] широко применялись на раннем этапе развития дифракционной оптики. Возможности этих методов ограничены в основном изготовлением круговых или линейных зонных пластинок с киноформным профилем. Алмазное точение [6] – хорошо зарекомендовавший себя процесс изготовления высокоточных оптических поверхностей в металлах, полимерах и кристаллах. Этот метод позволяет получать фазовый профиль с «блеском». Однако область применения алмазного точения ограничена изготовлением элементов с аксиальной симметрией. Сканирующие методы прямой лучевой записи являются наиболее универсальными и широко используются в микроэлектронике. Они основаны на сканировании сфокусированным амплитудно-модулированным лазерным или электронным пучком поверхности подложки, покрытой регистрирующим слоем. Записывающий пучок перемещается по заданным траекториям. Траектории являются прямыми линиями (для прямоугольной системы координат) или кругами и спиралями (для полярной системы координат).

Однако потребности современной дифракционной оптики ставят более сложные задачи, которые не имеют адекватного решения из-за отсутствия технологических комплексов (сочетание устройства и технологии) для микропрофилирования оптических поверхностей с минимальным размером элементов микроструктуры порядка $0,5$ мкм и световым полем до $200\text{--}300$ мм. Абсолютная точность топологии элемента должна быть на уровне $1/4\text{--}1/20$ от размера наименьшей дифракционной зоны. Кроме того, высота синтезируемой структуры должна плавно меняться от нуля до десятков микрон на одном скате при как можно более крутом переходе от зоны к зоне.

Разработка методов изготовления дифракционных оптических элементов была начата в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР в

середине 70-х годов. Основные усилия были направлены на создание прецизионных круговых лазерных систем записи (КЛЗС) дифракционных структур и разработку термохимической технологии получения фотошаблонов в тонких пленках хрома [7–9]. КЛЗС с аналогичной структурой были созданы позднее и в других исследовательских центрах [10–14].

Качество изготовленных ДОЭ существенным образом зависит от точности работы оборудования и числа технологических операций при тиражировании элемента [15]. Последующий перевод рисунка фотошаблона в материал подложки позволяет получить ДОЭ с бинарным фазовым профилем [16]. Для изготовления фазовых структур с «блеском» были разработаны и исследованы различные многоуровневые фотолитографические методы получения микрорельефа поверхности [17–19]. Метод, использующий $\log_2 M$ фотошаблонов для создания M фазовых уровней (дихотомический метод), позволил значительно упростить процесс изготовления ДОЭ. Однако возможности традиционных фотолитографических технологий ограничены при изготовлении ДОЭ с малым периодом зон T . Обусловлено это тем, что размер элементарной ступеньки составляет $T/M = 0,5–1$ мкм (дифракционная линза с числовой апертурой $NA = 0,1–0,2$ для видимого участка спектра имеет период 4–8 мкм). При таких размерах ступенек рельефа ограниченная точность совмещения фотошаблонов (доли микрона в лучших установках) приводит к падению дифракционной эффективности и увеличению доли рассеянного света.

В дальнейшем наши усилия были сосредоточены на разработке новых методов изготовления фазовых ДОЭ со сложным непрерывным профилем. Фоторастровый метод позволил изготавливать высокоэффективные ДОЭ на основе одного бинарного фотошаблона [19]. Применяв синхротронное излучение в этом методе, мы показали возможность тиражирования дифракционных элементов на сферические поверхности [20].

При поиске новых технологий лазерной записи полутонковых фотошаблонов мы обратили внимание на пленки аморфного кремния [21] и LDW-стекла [22], предоставленные нам для экспериментов фирмой "Capyon Materials" (США). В первом случае нам удалось записать структуры, имеющие предельное (для лазерной записи в видимой области спектра) пространственное разрешение, равное 1600 мм^{-1} . Во втором – структура фотошаблона из LDW-стекла обеспечила при одноступенчатом процессе тиражирования возможность изготовления элементов в кварце с дифракционной эффективностью 80–95 %.

В настоящей статье представлен обзор работ по созданию оборудования и технологий изготовления ДОЭ с бинарным, многоуровневым и непрерывным профилем, выполненных в лаборатории лазерных технологий ИАиЭ СО РАН.

1. Системы лазерной записи для изготовления ДОЭ. Большинство оптических систем обладает вращательной симметрией относительно оптической оси, поэтому разработанные нами устройства были предназначены для записи ДОЭ в полярной системе координат. При изготовлении элемента подложка со светочувствительным материалом непрерывно вращается, в то время как записывающий луч медленно движется в радиальном направлении. Экспериментальные результаты, представленные в настоящей работе, получены на КЛЗС, созданных в нашей лаборатории [7, 8].

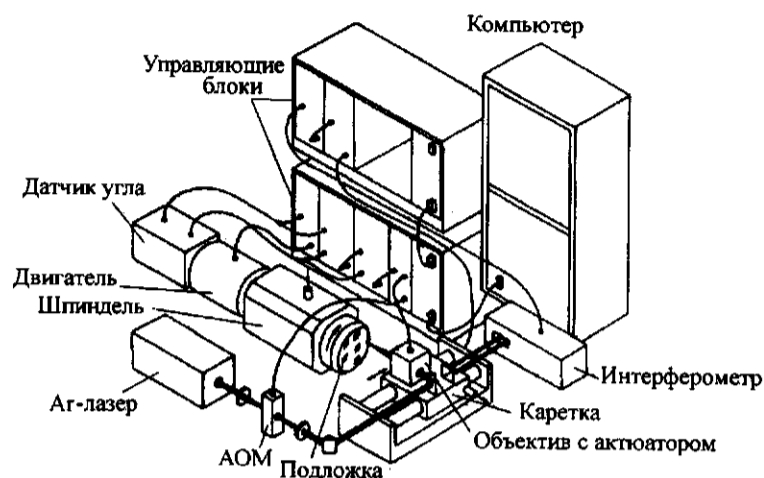


Рис. 1. Блок-схема КЛЗС, разработанной в ИАиЭ СО АН СССР в начале 80-х годов

1.1. *КЛЗС с горизонтальной осью шпинделя.* Первая КЛЗС (рис. 1) была разработана в ИАиЭ СО АН СССР в начале 80-х годов [7]. Ее конструкция напоминала токарный станок, где роль резца выполнял сфокусированный лазерный пучок. На торце азростатического шпинделя с расположенной горизонтально осью вращения крепилась подложка с регистрирующим материалом. Шпиндель приводился во вращение электрическим двигателем с установленным на оси оптическим датчиком углового положения. Датчик служил для стабилизации скорости вращения и определения углового положения подложки (погрешность $\pm 2''$) относительно записывающего луча. В качестве источника излучения использовался первоначально He-Ne-лазер, а затем аргоновый. Излучение лазера ($\lambda = 457-514$ нм) проходило акустооптический модулятор (АОМ) и поступало к фокусирующему микрообъективу ($40\times$, $NA = 0,65$). Микрообъектив и система автоматической фокусировки располагались на подвижной каретке, перемещение которой по азростатическим направляющим вдоль радиуса вращающейся подложки с регистрирующим материалом производилось линейным двигателем постоянного тока. Контроль перемещения осуществлялся лазерным интерферометром, разработанным в ИАиЭ СО АН СССР. Интерферометр совместно с системой управления линейным двигателем обеспечивал дискретность радиального позиционирования порядка $0,078$ мкм. Управление и контроль работы всех блоков системы осуществляла ЭВМ. Оптико-механический блок был собран на чугунном основании.

В 80-х годах с помощью этой КЛЗС были изготовлены ДОЭ с диаметром до 200 мм и минимальными размерами структуры, равными $1,0-1,5$ мкм. Точность выполнения топологии рисунка составляла $0,3$ мкм (среднеквадратичное значение). Номенклатура изделий включала корректоры aberrаций для объективов ИК-области, зонные пластинки, линзы Рэлея – Вуда, элементы с кольцевым импульсным откликом, линзаконы, мастер-диски магнитооптической памяти, круговые прецизионные шкалы с числом делений $3 \cdot 10^4$, голограммы асферических волновых фронтов для контроля зеркал телескопов, работающих в ИК-области спектра и т. д.

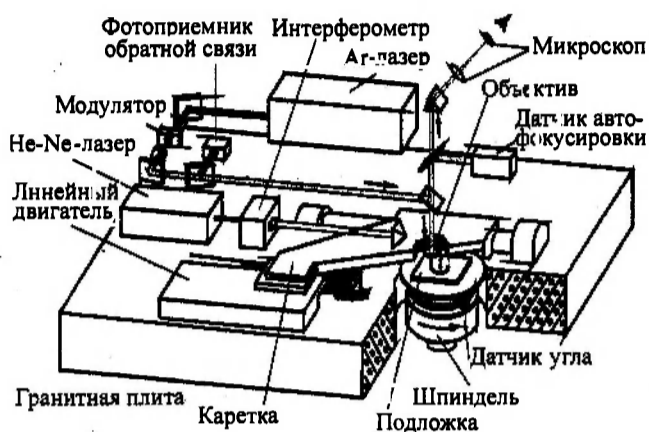


Рис. 2. Лазерная система записи CLWS-300C

1. 2. КЛЗС с вертикальной осью шпинделя. В 1994 году была пущена в эксплуатацию новая КЛЗС [8]. Она стала прототипом коммерческой версии, разработанной нами совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН и названной CLWS-300C [23]. Системы CLWS-300C эксплуатируются в нескольких лабораториях Европы [24, 25]. Упрощенная блок-схема КЛЗС приводится на рис. 2. Принцип работы аналогичен представленному в разд. 1.1. Главные отличия от первой версии состоят в следующем: ось аэростатического шпинделя расположена вертикально; механические и оптические блоки смонтированы на массивном гранитном основании; повышена точность позиционирования линейной координаты до значений 5–10 нм; точность измерения угловой координаты доведена до $\pm 1''$; создана программа преобразования координат, позволяющая осуществлять запись произвольных структур, заданных в прямоугольной системе координат; за счет контроля процесса записи по отражению и пропусканию расширен перечень материалов, на которых можно вести запись (фоторезисты, аморфный кремний, LDW-стекла).

Возможности новой записывающей системы иллюстрируют тестовые микроизображения, приведенные на рис. 3. Они показывают, что при круговой развертке минимальные размеры формируемых фрагментов линейных структур меньше диаметра записывающего пятна, равного в нашем случае 0,8 мкм.

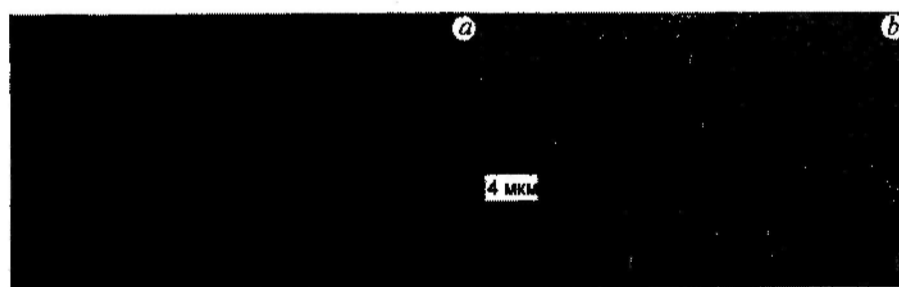


Рис. 3. Тестовые изображения, иллюстрирующие пространственное разрешение КЛЗС. Мира с периодом линий 1,6, 1,0 и 0,8 мкм (а) и тестовая структура с высотой треугольников 4 мкм (б)

2. Технологии изготовления ДОЭ. Задача изготовления фазового ДОЭ (киноформа) с функцией пропускания $T(x) = \exp[-j\varphi(x)]$ решается путем формирования рельефа с глубиной $h(x) = \varphi(x)/k(n-1)$, где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, n – коэффициент преломления материала оптической подложки. Известно несколько способов формирования такого рельефа. Нами исследовались следующие методы: многоуровневый (метод квантования фазы), полутонный [26] и фоторастровый [19], а также метод прямой записи дифракционной структуры [27]. Три первых метода основаны на применении фотолитографических процессов с использованием одного или нескольких фотошаблонов. Задача изготовления фотошаблонов ДОЭ отличается от аналогичной задачи в микроэлектронике. Фотошаблоны ДОЭ могут иметь размер до 200–300 мм и абсолютную точность топологии до долей длины волны света (в микроэлектронике основной параметр – совмещаемость фотошаблонов). Однако требования на микродефектность для них гораздо ниже, чем в микроэлектронике, так как дифракционная эффективность – это интегральный параметр, определяемый всей площадью элемента. Фотошаблоны ДОЭ, как амплитудные дифракционные элементы, могут быть проверены методами макроконтроля (например, методом интерферометрического контроля волнового фронта или методом фотометрирования дифракционной картины). Фотошаблоны ДОЭ могут изготавливаться на толстых высококачественных подложках, если требуется осуществить контактное копирование субмикронных дифракционных структур или добиться высокой точности волнового фронта.

Традиционный способ изготовления фотошаблонов ДОЭ (а также и микросхем) основан на экспонировании лазерным или электронным лучом слоя фоторезиста, нанесенного на пленку хрома, проявлении фоторезиста и травлении пленки хрома в образовавшихся окнах [10, 14]. Нам удалось существенно упростить этот процесс за счет применения термохимического действия лазерного излучения на тонкие пленки хрома [9]. Структура ДОЭ синтезировалась непосредственно в пленке хрома без использования промежуточного слоя фоторезиста. Термохимический метод прямой лазерной записи применялся в нашей лаборатории в течение многих лет для изготовления множества различных ДОЭ, в том числе с минимальным периодом дифракционных зон порядка 1,2 мкм и диаметром более 200 мм.

Наши усилия были направлены на разработку методов, позволяющих получить непрерывный фазовый профиль элемента с применением одного фотошаблона. Известно, что при экспонировании позитивных резистов излучением с интенсивностью $I(x)$ толщина оставшегося после проявления слоя резиста равна $h(x) = D_0 - cI(x)$, где D_0 – толщина исходной пленки, c – коэффициент. Если распределение интенсивности $I(x)$ пропорционально фазовой функции $\varphi(x)$, то в слое фоторезиста после экспонирования и проявления формируется ДОЭ с комплексной функцией пропускания $T(x) = \exp(-j\varphi(x))$. Как сформировать такое распределение? Один из способов решения этой проблемы заключается в использовании полутонного фотошаблона с функцией оптического пропускания $U(x) \sim \varphi(x)$. Метод создания таких фотошаблонов и основанный на нем полутонный метод изготовления фазовых ДОЭ были развиты в нашей лаборатории. В качестве материалов с изменяемым оптическим пропусканием были исследованы пленки аморфного кремния [21] и специальные LDW-стекла [26]. Другой предложенный и исследованный нами способ формирования заданного распреде-

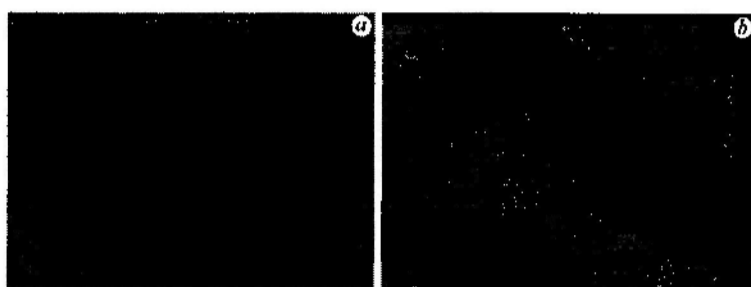


Рис. 4. Микрофотографии фрагментов бинарной голограммы, записанных в фоторезисте (а) и хроме (b). Шаг записи 0,7 мкм

ления $I(x)$ – фоторастровый [19] – позволил с помощью одного бинарного растриванного фотошаблона и проекционной системы изготавливать ДОЭ с непрерывной фазовой функцией и высокой дифракционной эффективностью. Ниже приводится описание апробированных нами методов изготовления ДОЭ.

2.1. *Прямая запись по фоторезисту.* КЛЗС позволяет осуществлять запись дифракционных структур путем прямого экспонирования пленки фоторезиста лазерным излучением ($\lambda = 457$ нм). Фоторезист проявляется по стандартной технологии. В качестве примера на рис. 4 показана структура одного и того же участка бинарной синтезированной голограммы, записанной в пленках фоторезиста (а) и хрома (b) по термохимической технологии. Голограмма рассчитывалась в прямоугольной системе координат с адресной сеткой 2 мкм и записывалась на КЛЗС в полярной системе координат с шагом 0,7 мкм. Пространственное квантование, заметное на обеих фотографиях, вызвано спецификой численного расчета и изготовления.

Однако применение метода прямой записи по фоторезисту в КЛЗС, на наш взгляд, ограничено из-за необходимости изменения мощности лазерного пучка пропорционально радиусу записи. При изготовлении ДОЭ большого диаметра надо управлять мощностью записывающего пучка с высокой точностью в очень широком динамическом диапазоне ($>10^4$), что технически трудно осуществить. Кроме того, большинство ДОЭ изготавливается на толстых и тяжелых оптических подложках, которые очень неудобны для нанесения однородных и тонких слоев фоторезиста. Эти ограничения, типичные для фоторезистной технологии, могут быть устранены альтернативными технологиями записи, представленными ниже.

2.2. *Термохимическая технология.* Процесс записи дифракционной структуры термохимическим методом иллюстрирует схема, представленная на рис. 5. При лазерном облучении пленки хрома, нанесенной на поверх-

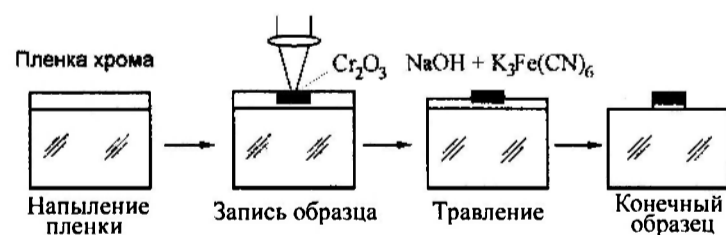


Рис. 5. Последовательность изготовления хромового фотошаблона по термохимической технологии

ность пластины, происходит образование тонкого слоя окисла, который играет роль защитной маски. Внутренняя структура облученной пленки хрома также изменяется. Обработка пленки в селективном травителе позволяет удалить необлученный хром [9]. Этот эффект позволяет реализовать негативный метод записи фотошаблона без применения фоторезиста.

При выборе экспозиции и условий экспонирования пленки на периферии синтезируемого элемента обычно записывается серия дорожек с шагом, превышающим диаметр сфокусированного пятна. Мощность лазерного пучка от дорожки к дорожке постоянно возрастает. На рис. 6, а приведена фотография серии тестовых дорожек (записанных с периодом 10 мкм при разной мощности лазера) до и после травления пленки в селективном травителе. При большой мощности записывающего пучка происходит частичное испарение материала пленки (область 1) и образование «брустеров», защищенных оксидом хрома. Уменьшение мощности пучка приводит к прекращению плавления и образованию «скрытого» изображения (термохимическая запись), которое проявляется после травления (область 2). При дальнейшем снижении мощности лазерного излучения его действие на пленку хрома прекращается и «скрытое» изображение не образуется (область 3). Появление достаточно устойчивого к действию травителя слоя окисла происходит при плотности мощности пучка $(2-8) \cdot 10^6$ Вт/см² (мощность излучения

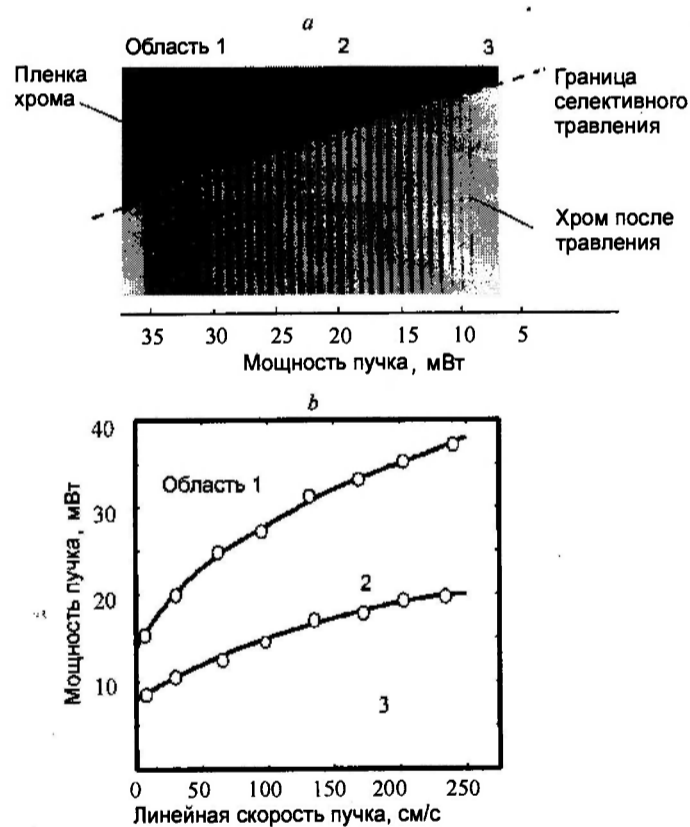


Рис. 6. Тестовые дорожки, записанные на хромовой пленке до и после травления (а), и зависимость положения области термохимии (область 2) от скорости движения подложки (б)

10–40 мВт, диаметр записывающего пятна 0,8 мкм). Запись осуществлялась излучением с длиной волны 488 или 514 нм. Зависимость положения области «скрытого» изображения от скорости движения пленки хрома относительно сфокусированного пучка лазера показана на рис. 6, б. Из приведенного графика следует, что ширина рабочей области 2 возрастает с увеличением относительной скорости движения подложки, т. е. с уменьшением времени экспозиции пленки.

Эффект образования «скрытого» изображения имеет место при любом способе и технологии напыления пленок хрома. Наилучшее пространственное разрешение процесса записи и наибольшая ширина области термохимических изменений (область 2) были получены при катодном распылении хрома в атмосфере аргона. Пространственное разрешение при записи на этих пленках превышает 1200 мм^{-1} (см. рис. 3). Высокая плотность и аморфность пленок хрома, полученных катодным распылением, обеспечивают однородность границ фрагментов рисунка без образования кристаллитов, но для записи на них требуется более высокая мощность лазерного пучка, чем для пленок хрома, напыленных методом испарения. Этот способ дает возможность синтезировать однородные по толщине пленки на подложках диаметром до нескольких метров. Более того, термохимическая запись на таких пленках сопровождается значительным изменением коэффициента отражения (вплоть до нескольких процентов), что позволяет контролировать процесс записи *in situ*. Пространственное разрешение для пленок, полученных испарением, лежит в пределах $700\text{--}1000 \text{ мм}^{-1}$.

2.3. *Многоуровневая технология.* В многоуровневой фотолитографической технологии наиболее критической операцией является совмещение фотошаблонов. Совмещение осуществляется по специальным знакам, которые располагаются вне структуры ДОЭ. Все фотошаблоны должны иметь строго согласованное положение знаков совмещения. Однако производство комплекта совмещаемых фотошаблонов (обычно 3–4 шт.) для изготовления высокоапертурных ДОЭ (точность совмещения около 0,1 мкм) является очень трудной задачей в первую очередь из-за температурного расширения материала (из стекла – 0,8 мкм/град, из кварца – 0,05 мкм/град для пластины диаметром 100 мм) и ошибки фиксации начала координат записывающего устройства. Нами предложен метод изготовления комплекта фотошаблонов в течение одного процесса записи на одной и той же подложке. Расположение структур ДОЭ со знаками совмещения по кругу позволяет получить комплект фотошаблонов на одной общей пластине. Все знаки совмещения и дифракционные структуры имеют одинаковые радиальные и угловые ошибки, так как записываются одновременно. Кроме того, метод позволяет значительно уменьшить время изготовления и стоимость комплекта фотошаблонов и повысить точность совмещения. На рис. 7 показана фотография пластины с комплектом из четырех совмещаемых фото-

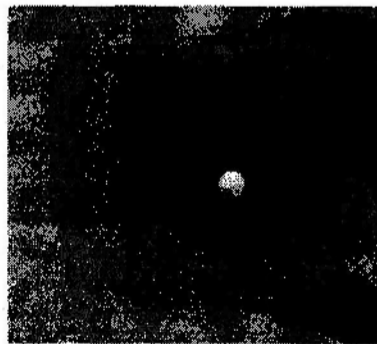


Рис. 7. Фотография пластины с комплектом из четырех совмещаемых фотошаблонов

шаблонов (пятая структура является тестовой) для изготовления ДОО с 16 уровнями квантования фазы. Время записи всех структур на КЛЗС составило около 2 часов, среднеквадратичная точность выполнения структуры 0,1 мкм.

2.4. *Фоторастровый метод.* Нами был разработан метод изготовления ДОО с высокой дифракционной эффективностью, основанный на применении единственного растриванного фотошаблона в сочетании с проекционной фотолитографией [19].

На рис. 8, *a* приведена схема фотолитографической установки, с помощью которой может быть реализован предлагаемый фоторастровый метод (halftone method). Изображение фотошаблона, освещаемого некогерентным светом, проецируется объективом в плоскость фоторезиста. Каждая зона дифракционного рисунка на фотошаблоне растривается линиями (или прямоугольниками) переменного размера. Обычно используется алгоритм широтно-импульсной модуляции. Проекционная система осуществляет фильтрацию пространственных частот фотошаблона и формирует в плоскости фоторезиста заданное распределение интенсивности (например, пилообразной формы), соответствующей профилю «блеска». Соотношение частоты среза F_c оптической передаточной функции объектива (ОТФ) и частоты F_d дискретизации функции пропускания растриванного фотошаблона показаны на

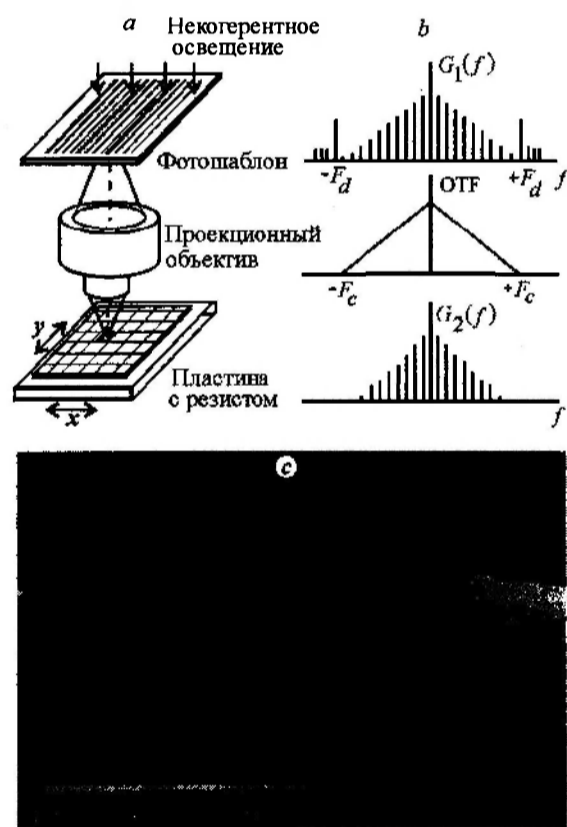


Рис. 8. Проекционная установка для реализации фоторастрового метода (*a*), схема фильтрации пространственных частот (*b*) и полученная с помощью сканирующего электронно-лучевого микроскопа фотография профиля изготовленного микрорельефа (*c*)

рис. 8, *b*. После проявления фоторезиста структура ДОО имеет микрорельеф с заданным непрерывным профилем. На рис. 8, *c* приведена фотография фрагмента ДОО (поперечный срез), изготовленного данным методом в фоторезисте. Экспериментальные образцы киноформных линз с числовой апертурой 0,1 имели дифракционную эффективность более 80% [19]. Линзы изготавливались в слое фоторезиста на стандартном фотолитографическом оборудовании, а затем переносились в стекло с помощью ионного травления. Высота рельефа в фоторезисте ограничена глубиной резкости проекционного объектива и для длины волны 436 нм и $NA = 0,35$ не превышает 3 мкм.

2.5. *Изготовление ДОО с непрерывным профилем методом рентгенолитографии.* Применение коротковолновых источников излучения (например, синхротронного излучения) позволяет существенно расширить возможности фоторастрового метода [20] и изготавливать ДОО с большой глубиной рельефа. Рентгеношаблон и пластина с резистом располагаются на расстоянии d друг от друга. Свободное расстояние (от нескольких десятков микрон до миллиметров) необходимо для осуществления усреднения (сглаживания) распределения интенсивности излучения в плоскости резиста. На рис. 9, *a* представлена схема изготовления ДОО с непрерывным профилем методом рентгенолитографии. Для экспонирования использовалось синхротронное излучение ($\lambda \approx 1$ нм), обладающее высокой интенсив-

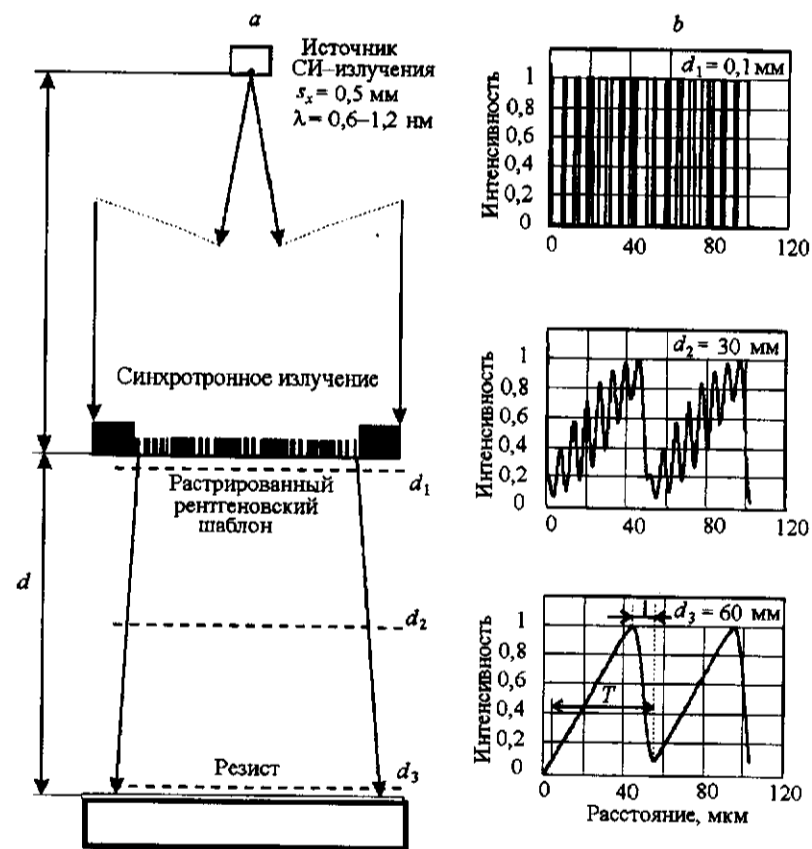


Рис. 9. Схема изготовления высокоэффективных ДОО (*a*) и графики распределения интенсивности излучения в теневой картине на разных расстояниях от рентгеношаблона (*b*)

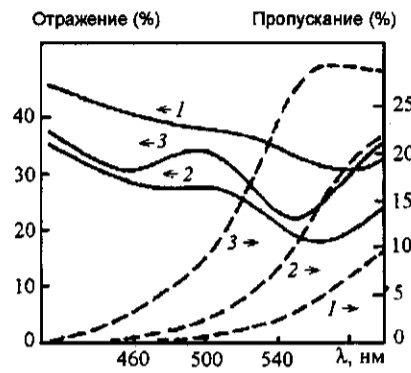


Рис. 10. Спектры отражения (сплошные кривые) и пропускания пленок (штриховые кривые) аморфного кремния при различной мощности записывающего лазерного пучка. Кривые 1 – до облучения, 2, 3 – после облучения с мощностью соответственно 9 и 13 мВт. Скорость сканирования 53 см/с

ностью и широким, практически «белым» спектром. Распределения интенсивности в теневой картине на разных расстояниях от рентгеношаблона (период растривания около 6 мкм) показаны на рис. 9, б. На расстоянии $d_3 \sim 60$ мм распределение экспонирующего излучения близко к требуемой пилообразной форме. Большая глубина резкости дает возможность получать ДОЭ с «глубоким» (до 30 мкм) профилем, а также проецировать рисунок на изогнутые поверхности, в том числе на сферические. Результаты экспериментов по синтезу ДОЭ с глубоким рельефом представлены в [20].

2.6. Полутонный метод (пленки аморфного кремния). С целью создания полутонных фотошаблонов были исследованы пленки аморфного кремния толщиной 50–200 нм. Пленки напылялись на стеклянную подложку методом ионно-плазменного распыления в атмосфере аргона. Температура подложки не превышала 60 °С, скорость напыления составляла 1,5–3 нм/с. Воздействие лазерного излучения приводит к осветлению пленок [21]. На рис. 10 показано изменение спектров отражения и пропускания для пленки толщиной 200 нм. Степень осветления зависит от мощности записывающего пучка и скорости сканирования (рис. 11). Линейный участок зависимости контраста,

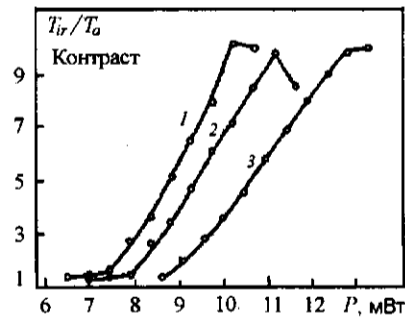
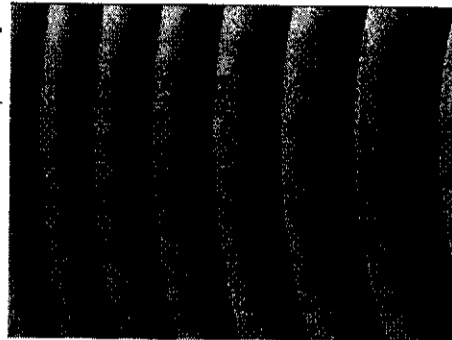


Рис. 11. Зависимость контраста пропускания от мощности пучка при различных скоростях сканирования (см/с): 1 – 49,2; 2 – 82; 3 – 140

Рис. 12. Фрагмент полутонового фотошаблона, изготовленного с применением пленки аморфного кремния



понимаемого как отношение пропускания облученной пленки к пропусканию исходной пленки (T_{ir}/T_a), можно использовать для записи полутоновых изображений. Контраст записи может достигать 1 : 10 для излучения с $\lambda = 436$ нм. В качестве примера на рис. 12 показан фрагмент полутоновой маски зонной пластинки Френеля.

2.7. Полутоновый метод (LDW-стекла). Заготовки LDW-стекла подвергаются ионному обмену для введения ионов серебра в структуру боросиликатного стекла. Последующее облучение электронным пучком приводит к образованию металлических частичек серебра, резко повышающих оптическое поглощение поверхностного слоя стекла. Сфокусированный лазерный пучок осуществляет тепловое стирание окрашенных частичек [26]. Коэффициент пропускания стекла зависит от мощности пучка, и его можно менять от 0,1–5 (исходный уровень) до 70–80 % (рис. 13). Полученный полутоновый рисунок в LDW-стекле можно затем перенести в фоторезист методом обычной контактной фотолитографии. Для получения рельефа достаточной глубины необходимо, чтобы контраст полученного рисунка лежал в пределах от 3 до 15. Эта величина без труда достигается при использовании LDW-стекла.

Применение круговых лазерных записывающих систем требует прецизионного управления мощностью пучка для получения заданной кривой пропускания в большом диапазоне скоростей сканирования. Проблема была решена с помощью метода импульсной записи [26] вблизи центра вращения подложки, при котором мощность лазерного пучка для заданного пропускания приблизительно постоянна в области скоростей сканирования от 0 до 7,5 см/с (радиус 0–1 мм) (рис. 14). На заготовках из стекла LDW-HR были записаны полутоновые фотошаблоны киноформных линз, аналогичные приведенному на рис. 12. Затем методом контактной печати полутоновый рисунок переносился в слой фоторезиста S1400

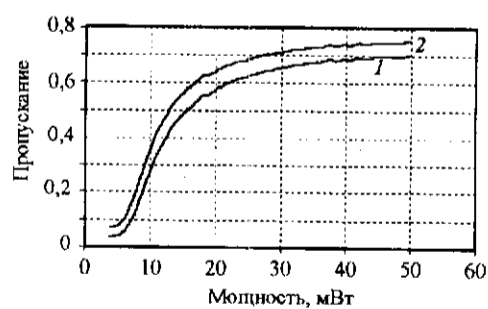


Рис. 13. Пример зависимости коэффициента пропускания LDW-стекла на длинах волн 514 (кривая 1) и 436 нм (кривая 2) от мощности лазерного пучка. Скорость сканирования пучка 15 см/с

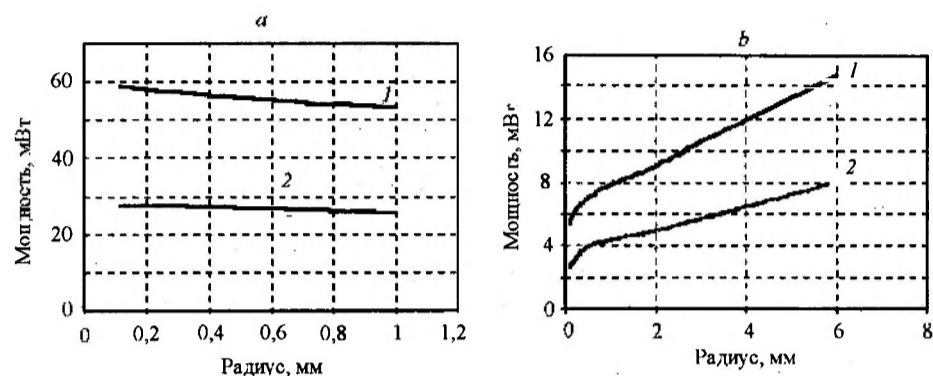


Рис. 14. Зависимости мощности пучка от радиальной координаты при импульсном (а) и обычном (б) способах записи для получения двух значений пропускания на длине волны 514 нм: 1 – 33, 2 – 6 %.

(толщина 2 мкм). Микроинтерферограмма поверхности линзы представлена на рис. 15. На рис. 16 показана зависимость дифракционной эффективности от размеров дифракционных зон и радиальной координаты измеряемого участка линзы. Для пилообразных структур с шириной зон 8 мкм дифракционная эффективность достигала 80 %. Полная дифракционная эффективность линзы (параметры: диаметр 10,6 мм, фокусное расстояние 82 мм, длина волны 514 нм) составила 85 %.

3. Экспериментальные результаты и примеры применения. Возможности предложенных устройств и технологий иллюстрируются ниже на примерах различных ДОЭ.

3.1. Синтезированные голограммы (СГ) для контроля оптических поверхностей. Для контроля формы плоских и сферических поверхностей в оптическом производстве широко применяют пробные стекла. Наборы пробных стекол изготавливаются с предельной для рефракционной оптики точностью. Отступления формы эталонных пробных стекол от заданной (ГОСТ 2786-62) обычно не превышают $\lambda/20$ ($\approx 0,03$ мкм). Это предельная для традиционной оптики точность. Контролировать с аналогичной точностью несферические поверхности – задача трудная и далекая от решения. Одним из практических путей ее решения является создание синтезированных голограмм, создающих при освещении асферический волновой фронт. Такие СГ выполняют роль «синтетических пробных стекол» и применяются в интерферометрах для контроля асферической оптики как компенсаторы или «нуль-корректоры». Падающий на них плоский волновой фронт преобразуется в асферический, форма которого совпадает с расчетной формой контролируемой поверхности. После отражения от контролируемой поверхности оптическое излучение в обратном ходе снова проходит СГ и интерферирует с опорным плоским волновым фронтом в интерферометре. Полученная таким

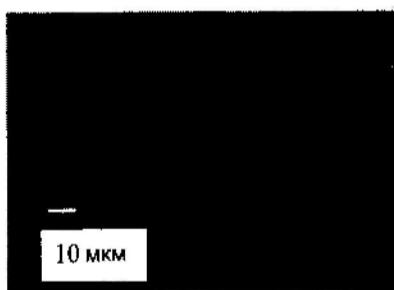


Рис. 15. Микроинтерферограмма зон дифракционной линзы

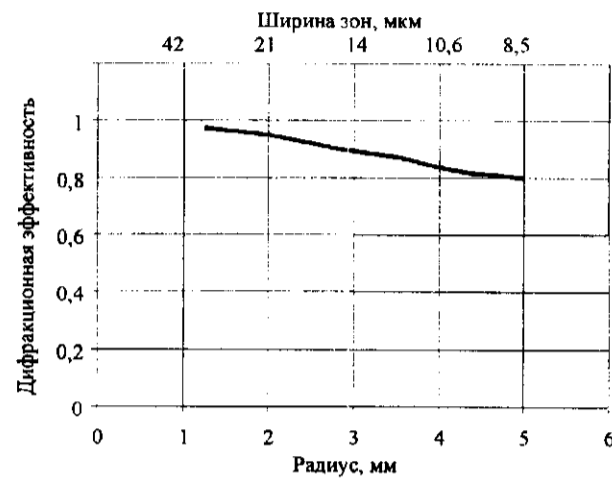


Рис. 16. Зависимость дифракционной эффективности линзы, изготовленной по полутонной технологии, от радиальной координаты измеряемого участка и ширины зон

путем интерферограмма несет информацию о форме асферической поверхности. Отступления от теоретической формы генерируемого волнового фронта не должны превышать $\lambda/20$. Оптическим (интерференционным) способом изготовить голограмму, обеспечивающую такую точность, затруднительно. Необходимо учесть искажения, вызванные усадкой фотослоя, локальными изменениями высоты и профиля штрихов, неравномерностью освещения поля и т. п. Наиболее перспективно, на наш взгляд, применение круговых записывающих систем для изготовления бинарных амплитудных и фазовых СГ. Наши работы в этой области проводились совместно с Лабораторией зеркал Стюардской обсерватории Аризонского университета (г. Тусон, Аризона, США). СГ применялись для контроля рефракционных «нуль-корректоров» и испытания крупногабаритных параболических главных зеркал новейших телескопов диаметром 6,5 м ($f/1,25$) – проект MMT и 8,4 м ($f/1,14$) – проект LBT [28].

Укажем на основные достоинства синтезированных голограмм, изготовленных на КЛЗС.

1. Малое время изготовления элемента. Для бинарного СГ диаметром 100 мм оно не превышает двух часов и не зависит от сложности дифракционного рисунка.

2. Высокая точность выполнения топологии структуры (круговых зон). Погрешность составляет доли длины волны, и ее можно оценить величиной 0,05–0,1 мкм.

3. Возможность встраивания в структуру СГ вспомогательных реперных знаков. Смещение штрихов одной шкалы относительно другой, наблюдаемое за счет нониусного эффекта, несет информацию об истории записи, т. е. искажениях, вызванных дрейфом параметров записи в процессе изготовления.

4. Возможность записи комбинированных СГ. Проверку асферического волнового фронта можно осуществить путем записи составной голограммы, в которой одна часть площади используется для создания асферического волнового фронта, а другая – сферического. При освещении такой голограммы



Рис. 17. Интерферограмма волнового фронта зонной пластинки (диаметр 58 мм, $f/1,1$), полученная в интерферометре Физо (а), и теневая карта ошибки фазы в пределах $\pm \lambda/20$ (б)

восстанавливаются одновременно сферический и асферический волновые фронты. Форма первого может быть легко проконтролирована. Если отступление от сферы не превышает $\lambda/20$, следует ожидать, что асферический волновой фронт формируется с той же точностью. Наши эксперименты подтвердили это предположение.

Достигнутая точность может быть продемонстрирована следующим примером [27]. Зонная пластинка диаметром 58 мм ($f/1,1$) была изготовлена непосредственно в пленке хрома толщиной 100 нм на плоской высококачественной подложке из плавленого кварца. Голограмма была рассчитана для длины волны 632,8 нм и имела 9879 зон с шириной, изменяющейся от 141 мкм в центре до 1,48 мкм на краю. Результаты испытаний доказали высокую точность изготовления этой сложной голограммы [27]. На рис. 17 представлены интерферограмма (а) и карта отступлений фазы волнового фронта (б) этого элемента. Анализ интерферограммы позволил сделать вывод, что среднеквадратичная погрешность изготовления структуры СГ равна 0,06 мкм.

3.2. Дифракционные аттенюаторы оптического излучения. Дифракционные аттенюаторы [29] представляют собой линейные или круговые ДОЭ, дифракционная эффективность которых изменяется заданным образом. Нулевой порядок дифракции используется в качестве выходного и проходит через решетку без углового отклонения. Амплитудные или фазовые решетки применяются как ослабители. В отличие от классических аналогов фазовые решетки позволяют управлять излучением мощных импульсных и непрерывных лазеров. На рис. 18, а и б показаны дифракционные аттенюаторы на основе круговых решеток двух типов. Для формирования поверхностного рельефа использовались различные методы, включая травление и напыление. На рис. 18, с и д приведены микрофотографии профиля решетки аттенюатора, изготовленного с применением ионного травления подложки из плавленого кварца через хромовую маску. Такой фазовый аттенюатор имеет высокую лучевую стойкость ($5-10 \text{ Дж/см}^2$ на длине волны 1,06 мкм) и позволяет изменять пропускание в диапазоне от 1 до 0,05.

3.3. Бифокальные интраокулярные линзы. Традиционные искусственные хрусталики глаза являются однофокусными и имеют ограниченный диапазон псевдоаккомодации, поэтому после имплантации требуется дополни-

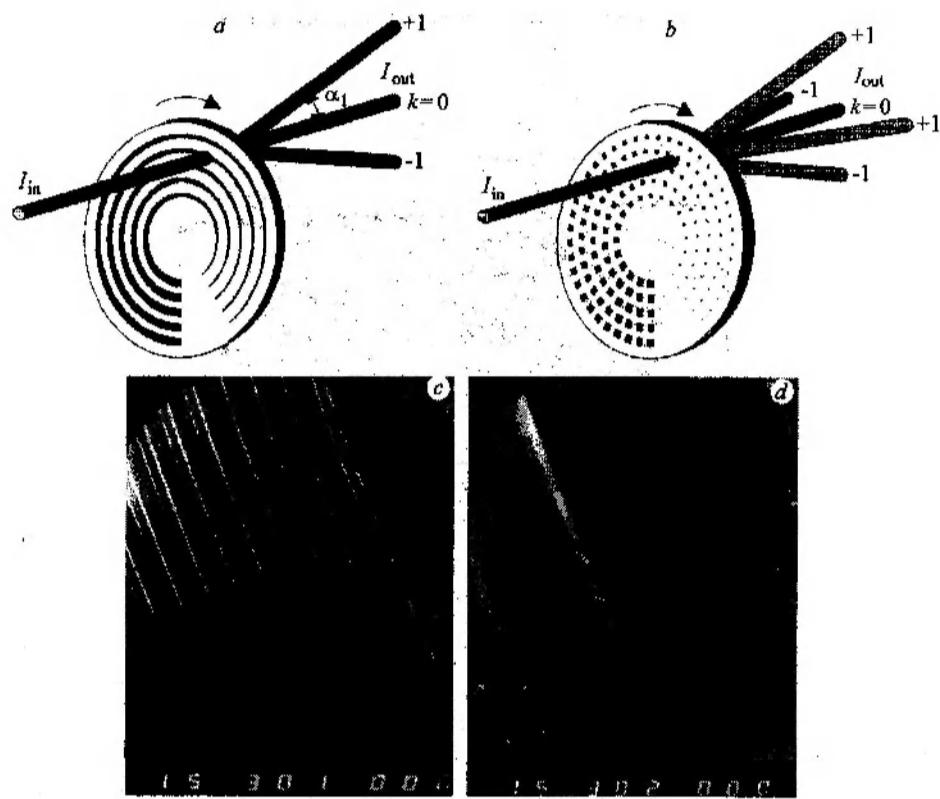


Рис. 18. Дифракционные аттенюаторы (а, б) и микрофотографии структуры (с, д), полученные с помощью электронного микроскопа

тельное улучшение зрения при помощи очков. Объем аккомодации расширяется при использовании двухфокусных линз, состоящих из двух частей: рефракционной и дифракционной. Гибридный искусственный хрусталик — это тандем стандартной рефракционной линзы и фазовой зонной пластинки Френеля. В нулевом дифракционном порядке зонная пластинка не имеет оптической силы, из-за чего интраокулярная линза подобна обычному рефракционному хрусталику, аккомодированному на бесконечность. В +1-м порядке появляется дополнительная оптическая сила, и гибридная линза становится способной проецировать на сетчатку близкие предметы. Наличие двух фокусов приводит (при дальнем и ближнем зрении) к образованию расфокусированного изображения, наряду со сфокусированным. Как показывают клинические испытания, расфокусированное изображение исключается при обработке зрительной информации в соответствующих отделах головного мозга.

Технология изготовления линзы, разработанной в нашей лаборатории, основывалась на методах фотолитографии и штамповки. На рис. 19 представлены фотография бифокальной интраокулярной линзы (а) и профилограмма дифракционной структуры (б) на плоской поверхности плоско-выпуклой рефракционной линзы. Дифракционная структура была получена по многоуровневой технологии с двух фотошаблонов. Испытания линз подтвердили, что их волновые aberrации лежат в пределах $0,8\lambda$ при среднеквд-

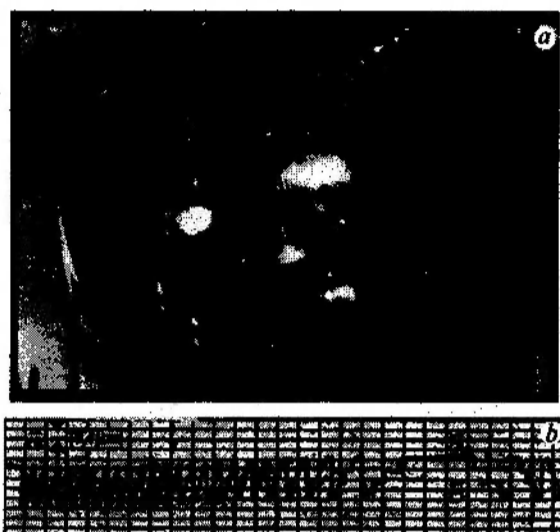


Рис. 19. Фотография бифокальной интраокулярной линзы (а) и профилограмма ее поверхности со стороны дифракционного элемента (б)

ратичной погрешности $0,18\lambda$. Последнее соответствует требованиям Международного стандарта ISO/DIS 11979-2 [30].

3.4. *Матрицы микролинз и дифракционные решетки.* Матрицы микролинз широко применяются в ряде оптических приборов. Классические матрицы микролинз выполняются в прямоугольной системе координат. Технология лазерной записи в полярной системе координат наиболее удобна для изготовления круговых матриц микролинз. На рис. 20 приведены микрофотографии круговой линзовой матрицы, состоящей из 1024 секционных фрагментов размером $0,5$ мм (а, б, с) и линейной решетки с периодом 2 и 4 мкм (д). Каждый фрагмент содержит линзу Френеля. Ошибки пространственного квантования положения зон внеосевых линз определяются шагом записи, равным $0,6$ мкм.

3.5. *Многopядковые дифракционные линзы.* При создании современных «лазерных скальпелей», систем определения направлений и координат, считывания информации, накачки лазеров и др. проводятся исследования сжатых («обостренных») лазерных пучков. Эти пучки концентрируются в пятно или каустику, пространственные размеры которых меньше дифракционного предела для данной апертуры. ДОЭ, осуществляющие аксионную фокусировку, детально рассмотрены в [30–32]. Результаты разработки и исследования дифракционного элемента с глубоким (по отношению к длине волны) фазовым рельефом представлены в [33]. Концентрация излучения в высоких дифракционных порядках позволила уменьшить в диаметре его каустику по сравнению со значением для первого порядка дифракции. ДОЭ был изготовлен по фоторастровой технологии (см. разд. 2.2) в слое фоторезиста S1400 толщиной 6 мкм. Для сглаживания распределения интенсивности экспонирующего излучения (436 нм) расстояние между растриваемым фотошаблоном (период бинаризации 6 мкм) и фоторезистом было выбрано около 20 мкм. Нанесение и обработка фоторезиста проводились по стандартной методике. На рис. 21 показано сечение дифракционной струк-

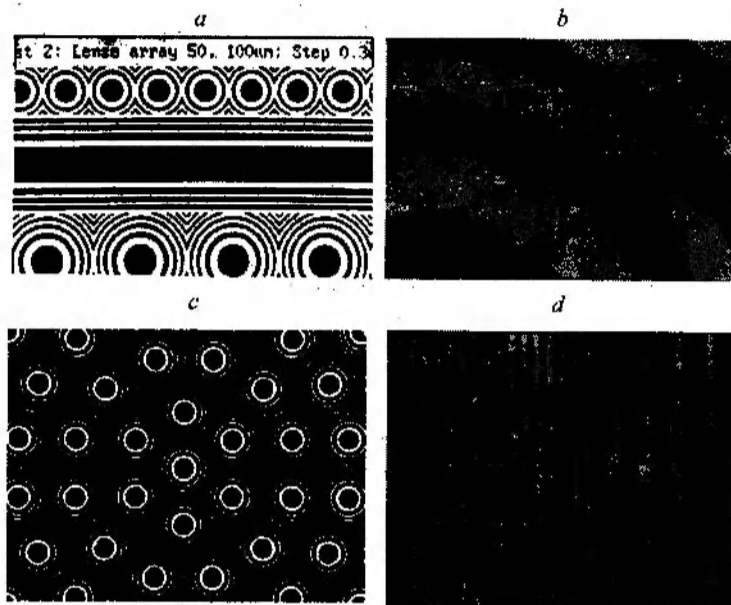


Рис. 20. Фрагменты поля матрицы микролинз с 1024 секторами размером 0,5 мм (a, b, c) и линейных дифракционных решеток с периодом 2 и 4 мкм (d)

туры с глубоким фазовым профилем в фоторезисте при наблюдении в оптическом (a) и электронном (b) микроскопах. «Сжатие» дифрагированных пучков демонстрируют фотографии (c, d) сечения светового поля в фокальной плоскости для +5-го и +7-го порядков соответственно.

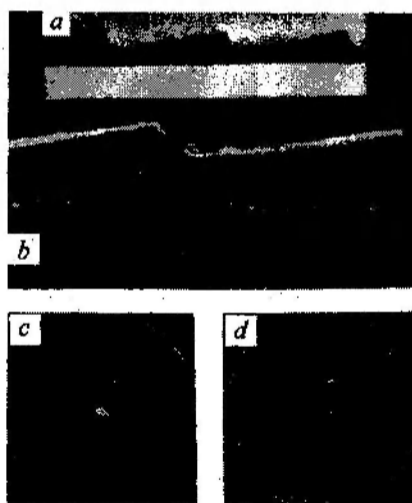


Рис. 21. Микрофотографии фрагментов фазового профиля высокопорядковой дифракционной линзы и распределение оптического излучения за линзой: a – вид профиля при наблюдении в оптический микроскоп, b – вид профиля в электронном микроскопе, c, d – распределение оптического излучения в +5-м и +7-м порядках дифракции

Заключение. Завершая краткий обзор работ, выполненных в лаборатории лазерных технологий ИАиЭ СО РАН в последние годы, отметим несколько ключевых моментов, важных, на наш взгляд, для развития дифракционной оптики.

1. Создание КЛЗС стимулировало исследования, направленные на разработку новых технологий синтеза дифракционных компонентов. Изготовление элементов в полярной системе координат оказалось продуктивным и выявило ряд важных преимуществ в сравнении с традиционными x - y -системами. Благодаря непрерывному сканированию по угловой координате существенно повышена скорость записи, снижен шум квантования, характерный для x - y -систем, сокращен объем данных, необходимый для описания элементов с круговой симметрией. Точность воспроизведения формы волнового фронта СГ достигла $\lambda/20$, что соответствует наивысшим стандартам классической оптики.

2. Значительным стимулятором развития экспериментальных работ стало применение термохимической технологии изготовления фотошаблонов и компонентов дифракционной оптики в тонких пленках хрома. Было показано, что эффект образования «скрытого изображения» под воздействием лазерного излучения имеет место при любом способе напыления пленок хрома. Разработанная в лаборатории технология отличается исключительной простотой и воспроизводимостью результатов в сочетании с высоким качеством получаемых микроизображений. В настоящее время эта технология с успехом применяется в Стюардовской обсерватории для изготовления самых больших в мире СГ на вогнутых поверхностях (диаметр ~ 2 м) [34].

3. Разработана и экспериментально апробирована фоторастровая технология синтеза высокоэффективных ДОЭ с помощью одного бинарного фотошаблона. Использование синхротронного излучения в сочетании с этой технологией позволило создать ДОЭ на плоских и криволинейных поверхностях с глубиной фазового профиля до 30 мкм в слоях полимеров и продемонстрировать возможность их ахроматизации.

4. Исследованы новые материалы для прямой лазерной записи полутонковых фотошаблонов: пленки аморфного кремния (a -Si) и поверхностно-модифицированные стекла (LDW-стекла). В новых материалах (a -Si) достигнуто рекордное для лазерной записи пространственное разрешение, равное 1600 мм^{-1} . Фотошаблоны дифракционных линз, изготовленные в LDW-стекле, при переводе их структуры в кварц дали возможность получить ДОЭ с дифракционной эффективностью в диапазоне 80–95 % в зависимости от ширины дифракционных зон.

5. Разработан метод изготовления СГ, предназначенных для контроля асферической оптики, с гарантированной точностью. Ошибки асферического волнового фронта не превышают $\lambda/20$ для оптических систем с апертурой $f/1$.

Дальнейшие наши усилия в области лазерных технологий для дифракционной оптики будут направлены на создание компактной КЛЗС, требующей не более $0,5 \text{ м}^2$ площади в чистом помещении и обеспечивающей более высокую точность изготовления элементов диаметром до 200 мм и возможность записи произвольных полутонковых или фазовых структур на плоских и сферических поверхностях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glaser T., Schroter S., Bartelt H. et al. High efficiency binary phase-transmission-grating // EOS Topical Meeting Digest Series // *Diffractive Optics*. 1997. 12. P. 32.
2. Faklis D., Morris M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses // *Appl. Opt.* 1995. 34. P. 2462.
3. Churin E. G., Bayvel P., Smirnitckii V. B. et al. Concave grating and convex mirror double dispersion spectrograph for optical network applications // *Appl. Opt.* 1997. 36, N 30. P. 7822.
4. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. Киноформные линзы. Ч. I. Оптический метод получения фотошаблона // *Автометрия*. 1977. № 5. С. 71.
5. Hatley M. C., Stevens R. F., Wilson S. J. The manufacturing of blazed zone plates using a Fabry – Perot interferometer // *J. Mod. Opt.* 1988. 35, N 2. P. 265.
6. Sweeney D. W., Sommarger G. Single element achromatic diffractive lens // *Diffractive Optics: Design, Fabrication and Application (Conference, Rochester)*. N. Y., 1994. P. 26.
7. Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Коронкевич В. П. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // *Автометрия*. 1981. № 3. С. 3.
8. Koronkevich V. P., Kiryanov V. P., Korol'kov V. P. et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning // *Proc. SPIE*. 1995. 2363. P. 290.
9. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в пленках хрома // *Квантовая электроника*. 1985. № 4. С. 755.
10. Haruna M., Takahashi M., Wakabayashi K. et al. Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses // *Appl. Opt.* 1990. 29. P. 5120.
11. Nomura T., Kamiya K., Miyashiro H. et al. An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe // *Precision Eng.* 1994. 16. P. 290.
12. Goltsov W., Liu S. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication // *Proc. SPIE*. 1990. 1211. P. 137.
13. Ogata S., Tada M., Yoneda M. Electron-beam writing system and its application to large and high-density diffractive optic elements // *Appl. Opt.* 1994. 33. P. 2032.
14. Bowen J. P., Michaels R. L., Blough C. G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation // *Appl. Opt.* 1997. 36. P. 8970.
15. Полещук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их измерения // *Автометрия*. 1997. № 6. С. 42.
16. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // *Автометрия*. 1985. № 1. С. 3.
17. Спектор Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // *Автометрия*. 1985. № 6. С. 34.
18. Нальчикова И. Г., Рябчин А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // *Там же*. С. 38.
19. Полещук А. Г. Изготовление рельефно-фазовых структур с непрерывным или многоуровневым профилем для дифракционной оптики // *Автометрия*. 1992. № 1. С. 66.
20. Makarov O. A., Chen Z., Krasnoperova A. A. et al. A new application for X-ray lithography: fabrication of blazed diffractive optical elements with a deep phase profile // *Proc. SPIE*. 1996. 2723. P. 261.
21. Гочияев В. З., Корольков В. П., Соколов А. П., Чернухин В. П. Полутонная оптическая запись на пленках a-Si // *Квантовая электроника*. 1989. № 11. С. 2343.

22. **Daschner W., Long P., Stein R. et al.** Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass // *Appl. Opt.* 1997. **36**, N 20. P. 4675.
23. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Kiryanov V. P. et al.** Circular laser writing system – CLWS-300C /EOS Topical Meeting Digest Series // *Diffractive Optics*. 1997. **12**. P. 222.
24. **Guhr J.** Test results of the circular laser writing system CLWS-300/c // *Ibid.* P. 206.
25. **Перло П., Синези С., Рипетто М. и др.** Использование круговой лазерной записывающей системы для изготовления полутоновых фотошаблонов дифракционных оптических элементов на основе DLW glass пластинок // *Компьютерная оптика*. Самара: СГАУ, 1997. **17**. С. 85.
26. **Корольков В. П., Малышев А. И., Никитин В. Г. и др.** Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекло // *Автометрия*. 1998. № 6. С. 27.
27. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Korol'kov V. P. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // *Proc. SPIE*. 1997. **3010**. P. 168.
28. **Burge J. H.** Null test optics for MMT and Magellan 6.5 m *f*/1.25 primary mirrors // *Proc. SPIE*. 1994. **2199**. P. 658.
29. **Полещук А. Г.** Дифракционные фильтры переменного пропускания // *Автометрия*. 1997. № 5. С. 22.
30. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Искаков И. А. и др.** Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза // *Автометрия*. 1997. № 6. С. 26.
31. **Koronkevich V. P., Mikhaltsova I. A., Churin E. G., Yurlov Yu. I.** Lensacon // *Appl. Opt.* 1995. **34**. P. 5761.
32. **Коронкевич В. П.** Пространственное распределение интерференционного поля за круговыми зонными пластинками // *Автометрия*. 1996. № 3. С. 78.
33. **Коронкевич В. П., Харисов А. А., Гейл М. Т., Шутц Х.** Многопорядковые дифракционные линзы для формирования бесселевых пучков // *Автометрия*. 1996. № 5. С. 38.
34. **Burge J. H.** Application of computer-generated hologram for interferometric measurement of large aspheric optics // *Proc. SPIE*. 1995. **2576**. P. 258.

Поступила в редакцию 30 сентября 1998 г.