

НОВЫЙ ОБЛИК ОПТИКИ

В. П. КОРОНКЕВИЧ, А. Г. ПОЛЕЩУК



В. П. Коронкевич



А. Г. Полецук

*Очарован внезапною прелестью.
Елки, думаешь, где ж это, братцы, я?
И стоишь так с отвисшею челюстью,
Но потом понимаешь: ДИФРАКЦИЯ!*

Игорь Иртеньев. «Пастораль II»

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционная оптика - порождение века информационных технологий. Она не могла появиться ранее из-за отсутствия таких инструментов, как лазер и компьютер. Создание микрорельефа поверхности с пространственным разрешением порядка длины волны света требует применения специальных материалов и новых технологий формообразования поверхности. За всю новейшую историю (~ 100 лет) оптики научились изготавливать только один дифракционный элемент - дифракционную решетку для спектральных приборов. Для осуществления этого были изобретены и разработаны специальные, прецизионные механические гравировальные машины. Для изготовления дифракционных элементов с произвольной топологией поверхности оборудование появилось только сегодня.

И все же голограммы и дифракционные оптические элементы (ДОЭ) незаметно входят в нашу жизнь. Когда в магазине кассир считывает код с товаров, которые вы покупаете, он пользуется лазерным устройством, где компьютерно-синтезированная голограмма выполняет одновременно несколько функций: формирует лазерный пучок, направляет его на штриховой код, сканирует луч в разных направлениях и затем собирает отраженное от штриховой марки излучение на фотоприемник. В проигрывателях компакт-дисков "лазерная игла" содержит дифракционную линзу, помогающую собрать световой пучок в точку, размеры которой не превышают доли микрометра. В двухфокусных искусственных хрусталиках глаза наличие дифракционной линзы помогает увеличить объем аккомодации глаза и позволяет видеть близкие и далекие предметы практически без применения очков. Дифракционные элементы широко используются в измерительной технике, оптике лазеров и военной технике.

Новые элементы все настойчивее входят в нашу жизнь. Мы привыкаем и не обращаем внимания на радужные голограммы, которые

шофера наклеивают на ветровое стекло, на "радужки", защищающие товары от подделки, на цветные печати, сопровождающие ценные бумаги, банкноты, визы в паспорте и фирменные знаки. В нескольких странах выпускаются "голографические почтовые марки", создающие объемное изображение. Художники начали "рисовать" первые картины, заменив краску чистым дифракционно-интерференционным цветом. Появились книги с иллюстрациями, где цвет возникает за счет дисперсии (разложения) белого света после отражения от тонкой дифракционной отражательной решетки. В повседневную практику вошли «голографические ключи», содержащие биометрические данные хозяина квартиры или офиса. Таких примеров применения новых элементов с каждым днем становится все больше и больше. Некоторые фирмы, стараясь повысить конкурентоспособность своего товара, впечатывают голограммы, создающие объемный рисунок, на конфеты и пряники.

Дифракционные элементы не являются конкурентами традиционной оптики. В свое время революция в радиоэлектронике, вызванная созданием транзисторов, а затем микросхем, привела к появлению новых отраслей промышленности и в корне изменила нашу жизнь. Похожая ситуация складывается и в оптике. Основу классической оптики составляют линзы, призмы, зеркала. Эти элементы уже давно достигли пределов совершенства. Дальнейшее развитие оптики связывают с широким практическим применением дифракционных элементов, которые представляют собой тонкие стеклянные пластинки, одна из сторон которых имеет рельеф с поперечными размерами и глубиной в доли микрометра. Топология и форма микрорельефа поверхности рассчитываются с помощью компьютера. Такие элементы могут заменять сложные объективы, преобразовывать по заданному закону лазерное излучение, формировать изображения объектов, рассчитанных компьютером. Исполь-

зование плоских оптических элементов в оптике открывает перспективу создания дешевых, легких, компактных и функционально сложных оптических приборов. Диапазон применения ДОЭ очень широк: от искусственных хрусталиков глаза человека до оптики космических телескопов. Сейчас уже можно сказать, что оптика будущего будет во многом основана на их использовании.

Потенциальные возможности внедрения дифракционных элементов и компьютерно-синтезированных голограмм сдерживаются отсутствием методов изготовления поверхностного рельефа. Фирма Intel, вложив сотни

миллионов долларов в развитие нанотехнологий, создала микропроцессоры с размерами проводников менее десятой доли микрона. Структура поверхности ДОЭ имеет минимальные размеры около половины микрона (длина волны света), однако, общие размеры могут достигать нескольких метров в диаметре, что во много раз больше размеров кристалла микросхемы. Кроме того, микрорельеф поверхности элемента имеет очень сложную трехмерную форму. Поэтому методы изготовления ДОЭ существенно отличаются от методов изготовления микросхем и значительно сложнее их.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Как устроена дифракционная линза и каковы ее отличия от традиционной рефракционной линзы? Мы приводим пример с линзой, поскольку линза - это базовый элемент, как классической, так и дифракционной оптики. Она предназначена для фокусировки света и построения изображений объектов, т.е. для геометрических и волновых преобразований световых пучков. Например, параллельный пучок (плоская волна) на входе она преобразует в сходящийся пучок, т.е. сферическую волну на выходе.

На рис.1 представлена обычная плоско-выпуклая линза 1 и приведен геометрический способ построения на ее основе дискретной (дифракционной) структуры 2. Для этой цели линза разделена на тонкие сферические слои одинаковой толщины (штриховые линии). Радиусы слоев равны радиусу кривизны сферической поверхности линзы, а их толщина равна величине $h=N\lambda/(n-1)$, где λ - длина волны света, а N - целое число, n - коэффициент преломления материала линзы. На рис.1а показано четыре слоя. В действительности, если линза имеет толщину, например, $d=5\text{мм}$, то при $\lambda=0.5\text{мкм}$, $n=1.5$ (стекло) и $k=1$ число сфери-

ческих слоев толщиной 1 мкм будет равно 5000, поэтому очевидно, что пример, приводимый на рис.1 является условным. На плоской поверхности линзы, различные слои можно объединять в дискретную ступенчатую структуру 2 линиями, параллельными оптической оси. Полученная конфигурация 2 называется зонной пластинкой или дифракционной линзой, а на современном языке - киноформной линзой. Число зон с радиусом $r_1 \dots r_k$ равно числу сферических слоев. Можно показать, что площади зон линзы равны друг другу. Полученная структура представляет собой круговую рельефную дифракционную решетку (рис.1б), шаг которой $s = r_2 - r_1$ уменьшается к периферии, и ее действие на световую волну будет аналогично действию традиционной линзы.

Между приведенными конфигурациями линз 1 и 2 имеются следующие существенные различия:

- В обычной рефракционной линзе длина оптического пути от точки объекта до его изображения является постоянной для всех лучей, пересекающих апертуру линзы (принцип Ферма). Линза работает за счет явления *рефракции* и закона преломления пучка света на ее

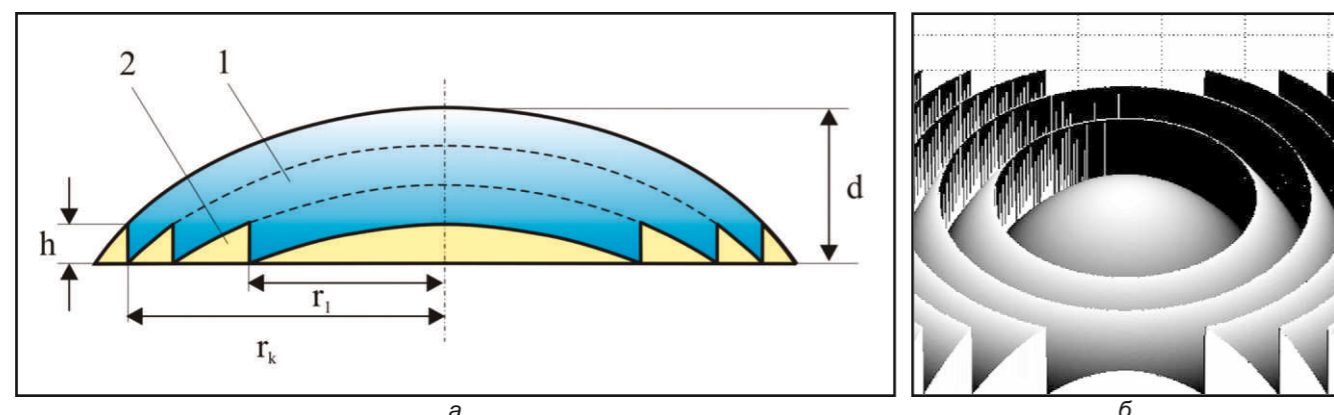


Рис.1. Преобразование плоско-выпуклой линзы в киноформную линзу (а) и ее трехмерная модель (б).

поверхности. Условно такую линзу можно представить как совокупность призм с разными углами, возрастающими от центра к периферии, поэтому будут различными и углы преломления световых лучей, попадающих на каждую из призм.

- В дифракционной линзе длина оптического пути на границах зон претерпевает скачки, равные λ , (при $N=1$) или $N\lambda$, если линза имеет «глубокий» профиль ($N>1$). Она работает за счет явления *дифракции* на круговой тонкой решетке, шаг которой уменьшается к периферии линзы и для больших апертур может достигать значений порядка длины волны света. Иногда говорят, что при $N \gg 1$ дифракционная структура переходит в рефракционную, т.е. класс ДОЭ включает в себя и рефракционные. Однако надо всегда помнить, что линзы работают, используя разные физические явления: рефракцию и дифракцию. Очень важной и полезной особенностью дифракционной линзы является ее очень маленькая толщина. В нашем примере, на рис.1, она составляет всего 1 мкм. При одинаковой оптической силе толщина дифракционной линзы может быть в тысячи раз меньше, чем у классических.

На рис.2 показаны простейшие преобразования световых пучков, которые выполняют рефракционные и дифракционные элементы: поворот, светоделение и фокусировка. Простейшая призма отклоняет световой пучок на угол $\alpha_p = \beta(n-1)$, причем у стекла и у большинства известных оптических материалов коэффициент преломления увеличивается с уменьшени-

ем длины волны. Это означает, что пучок синего света из-за дисперсии отклонится больше, чем красный. Дифракционный аналог призмы - дифракционная решетка (ДР) с пилообразной формой рельефа (решетка с «блеском») отклоняет свет на угол $\alpha_d = \lambda/s$, где s - период решетки, причем угол отклонения растет с увеличением длины волны. Такая решетка будет отклонять в заданном направлении до 100% энергии светового потока, если выполняется условие $\alpha_d = \alpha_p = h(n-1)/s$, т.е. микрорельеф действует как набор микропризм. Если рельеф решетки будет иметь прямоугольную (бинарную) форму и глубину в 2 раза меньше, чем у пилообразной ДР, то световой пучок разделится на два равных пучка. Можно подобрать форму рельефа таким образом, что ДР будет делить световой пучок на любое заданное количество пучков. Дифракционная линза не просто является аналогом обычной рефракционной линзы, а имеет существенное преимущество: она фокусирует световой пучок в пятно, определяемое только дифракцией на ее апертуре. То есть тонкая дифракционная линза заменяет сложный многолинзовый объектив (рис.3). Фокусное расстояние дифракционной линзы можно оценить по формуле: $f \approx Ds_{min}/2\lambda$, где D - диаметр линзы. При $D = 6\text{мм}$, $\lambda = 0.63\text{мкм}$ и $s_{min} = 1\text{мкм}$ фокусное расстояние составляет $f = 5\text{мм}$. Такая линза (тонкая стеклянная пластинка с микрорельефом на одной из сторон) будет действовать как высококачественный $40\times$ объектив микроскопа.

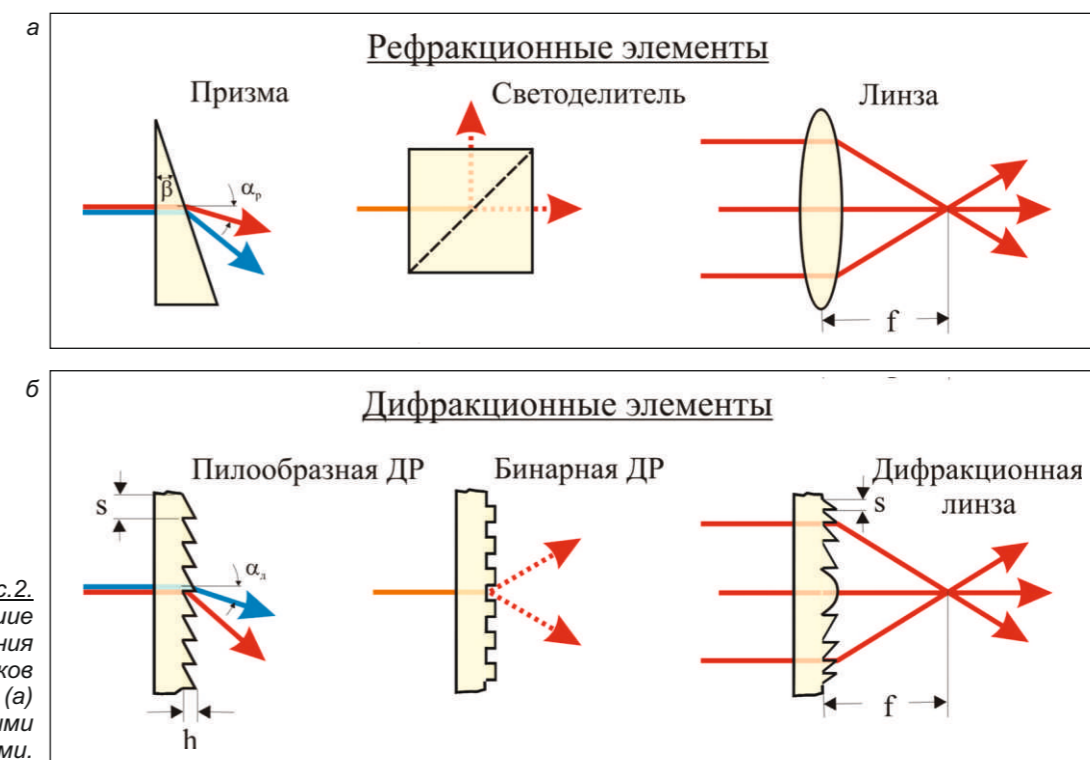


Рис.2. Простейшие преобразования световых пучков рефракционными (а) и дифракционными (б) элементами.

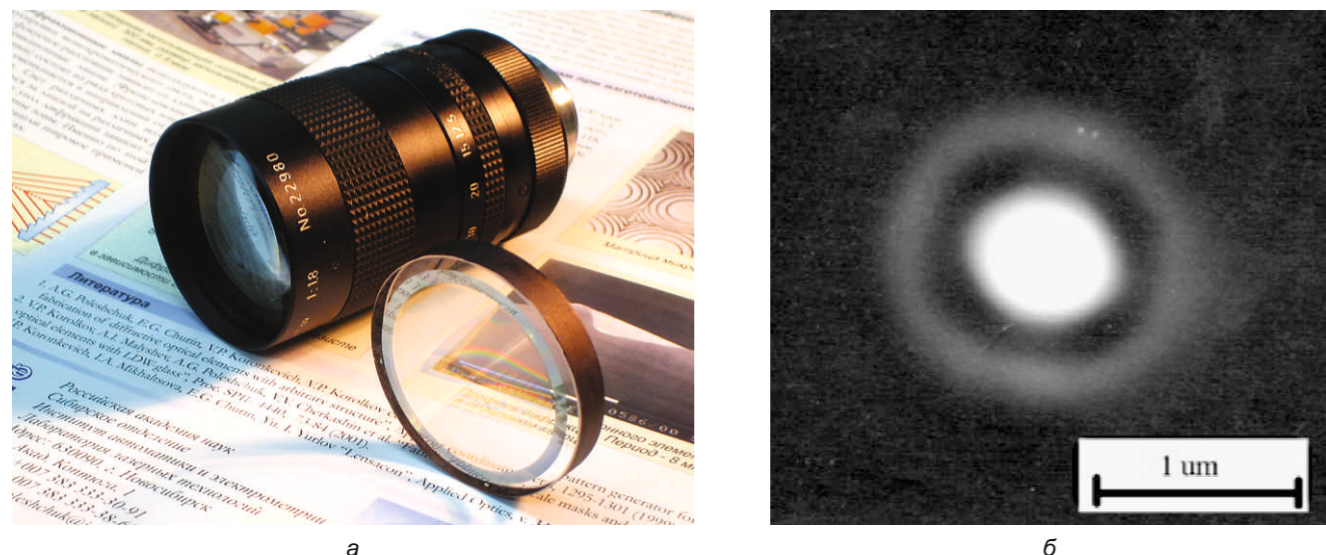


Рис.3. Многолинзовый объектив и превосходящая его по качеству дифракционная линза (а) и фотография сфокусированного дифракционной линзой с числовой апертурой $NA=0.65$ лазерного пятна (б) (633нм).

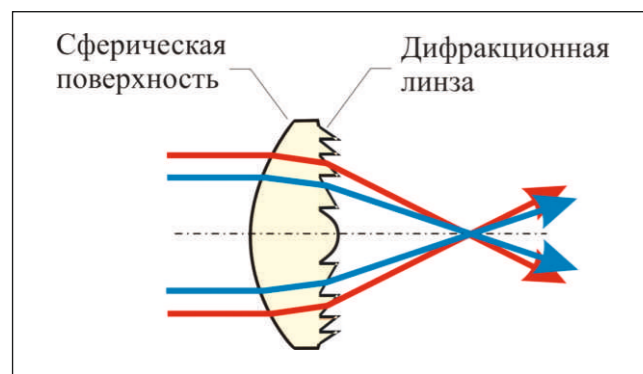


Рис.4. Гибридная дифракционно-рефракционная линза.

Обратим внимание на еще одну важную особенность дифракционных структур - они позволяют создавать гибридные линзы, т.е. сочетания дифракционных и рефракционных элементов (рис.4). Так как знаки дисперсии света противоположны в дифракционных и рефракционных элементах (см. примеры с призмой и ДР), гибрид из рефракционной линзы и ДР позволяет построить оптический элемент, не имеющий хроматизма, т.е. работающий в белом свете. Это свойство используется при создании объектов для проигрывателей DVD-дисков, приборов ночного видения и искусственных хрусталиков глаза, о которых речь пойдет далее.

ИСТОРИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ

Разработка методов изготовления ДОО была начата в Институте автоматики и электротехники СО РАН в середине 1970-х гг. в лаборатории когерентной оптики, переименованной позднее в лабораторию лазерных технологий. В то время было уже известно несколько основных способов изготовления ДОО: оптические (интерференционные или голографические), алмазное точение, запись сканирующим пучком (электронным или лазерным). Вначале мы пытались изготовить базовый дифракционный элемент - линзу - путем фотографирования интерференционной картины, имеющей круговую симметрию. Такую картину дает интерферометр Фабри-Перо. Радиус интерференционных колец в этом приборе соответствуют правилу Ньютона, т.е. их радиусы соотносятся друг к другу, как корни квадратные из целых чисел. Такое же распределение имеют радиусы обычной зонной

пластинки Френеля. Фотографируя такую картинку, мы получаем элемент - дифракционную линзу, которая может фокусировать свет. Для того чтобы повысить дифракционную эффективность такой линзы, мы использовали интерферометр Фабри-Перо с пленкой Троицкого. Распределение интенсивности вдоль радиуса в таком интерферометре имеет пилообразную форму (рис. 1б), т.е. за одну экспозицию сразу получалась киноформная линза. Эти работы, выполнены в нашей лабораторией Г.А Ленковой, В.В. Донцовой и И.А. Михальцовой, после опубликования имели определенный успех и докладывались на советскоамериканском семинаре по оптике.

Толчком к созданию универсального метода производства ДОО послужили работы профессора А. Корпеля (США). В 1975 г. на советско-американском семинаре по оптике он докладывал работу и демонстрировал видео-

приставку к телевизору, которая с дискового носителя (диаметр около 30 см) показывала цветной фильм. К 1985 г. фирма «Зенит» планировала выпуск приставок и видеодисков на сумму до 4 млрд. долларов. Этот план по экономическим причинам не удалось реализовать. Главное, на чем настаивал профессор Корпель, - будущее за технологией прямой лазерной записи на дисковые носители. Уже осенью 1975 г. В. П. Коронкевич предложил создать в лаборатории лазерную записывающую систему (ЛЗС), которая могла бы на дисковый носитель записывать цифровую информацию. К этому времени в лаборатории уже были разработаны и созданы лазерные интерферометры, позволяющие измерять расстояние с точностью до десятой доли микрона, лазерные доплеровские измерители скорости и теневые приборы для измерения формы волнового фронта (прообраз системы автофокусировки). А главное, имелся опыт их применения в прецизионном станкостроении. Задел был достаточно весомым. Первые два года ЛЗС создавалась для записи цифровой информации на дисковый носитель и имела соответствующее название: «Видеодиск». Однако к 1978 г. нам уже стало ясно, что соревноваться с фирмами «Зенит», «Филипс», «Сони» по выпуску видеодисков - неперспективно. Поэтому направление исследовательских работ на установке было плавно переключено на разработку методов записи осесимметричных дифракционных элементов. Нам помогло то, что конструкция нашей установки, в отличие от систем Корпеля, позволяла перемещать платформу с головкой записываемой структуры. Как известно, в дисковых системах записи структура записывалась не от центра, а от радиуса равного примерно 20-25 мм. Эта особенность и позволила нам уже в 1978 г. записать на халькогенидной пленке дифракционные эле-

менты и впервые доложить результаты на Международной конференции по голографии в Ульяновске.

В институте к середине 70-х гг. уже была разработана и широко применялась передовая для того времени технология оптической записи на пленках ХСП (лаборатории Малиновского, Цукермана). Было принято решение использовать пленки ХСП для записи на установке «Видеодиск». Первые эксперименты по записи проводились плавлением локального участка пленки движущимся сфокусированным пучком He-Ne лазера. Качество записи было довольно низким - от плавления образовывался «бруствер», часть материала пленки испарялась и оседала на соседние участки и даже на фокусирующий объектив. По такой технологии были изготовлены первые дифракционные элементы, отработаны основные узлы установки записи и ее программное обеспечение (рис. 5а,б).

Однако низкая механическая прочность и температура плавления пленок ХСП, их плохая адгезия к подложке, большое поглощение в оптическом диапазоне, высокий коэффициент преломления, наличие в пленке вредных для здоровья людей веществ, а также человеческий фактор (уход из лаборатории технолога В.И. Наливайко), заставил нас в 1982 г. начать поиск других методов лазерной записи. Особенностью этого этапа было то, что вопросами технологии занялись научные сотрудники - оптики - физики (А. Г. Полещук и Е. Г. Чурин), ранее вопросами технологии впрямую никогда не занимавшиеся. Первым делом на установке записи был установлен мощный аргоновый лазер с более короткой длиной волны (488 нм) и применен более сильный фокусирующий объектив ($NA=0.65$). Это позволило получить сфокусированное пятно диаметром около 0,6-0,8 мкм. Плотность мощности (более 1 МВт/см^2) в сфокусированном пятне была

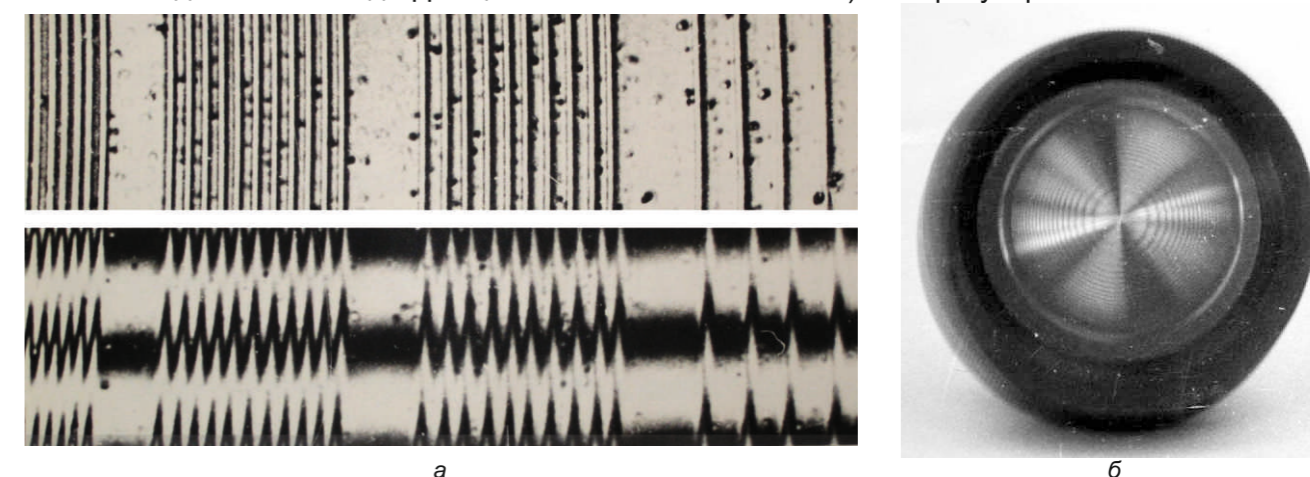


Рис.5. Фотография (б) и интерферограмма тестовых дорожек (а) с периодом 1,5, 2, 2,5 и 5 мкм записанных на пленке ХСП и первый ДОО с пилообразным профилем зон (1978 г.).

такая, что позволяла за доли микросекунды локально испарять практически все доступные нам пленки металлов. Основное внимание было сосредоточено на лазерной обработке тонких пленок хрома, как наиболее доступных. Мы начали исследовать методы записи ДОЭ путем испарения пленки хрома, но уже в первых экспериментах нами был случайно обнаружен термохимический эффект образования скрытого изображения. Уже позднее мы узнали, что подобная технология была открыта ранее в Ленинграде группой исследователей под руководством В.П. Вейко. Скрытое изображение в хrome мы досконально исследовали и получили новые научные результаты, которые позволили нам производить запись высококачественных дифракционных амплитудных элементов: штриховых и угловых шкал, кодовых дисков, сеток и различного рода фотошаблонов, которые широко применялись в оптике. Эти результаты сразу привлекли к нам внимание оптической промышленности (УОМЗ, г.Свердловск и НПЗ, ЦКБ, г. Новосибирск), и в лаборатории, наконец, вместе с хоздоговорами появились деньги. Следует отметить, что все работы по созданию установки и исследованию технологий в течение почти пяти лет не финансировались, а велись на инициативной основе. Эти исследования подробно описаны в наших обзорных статьях. В 80-е гг. мы постоянно совершенствовали установку для изготовления дифракционных элементов. Совместно с НПО «ЛУЧ» были записаны первые в России мастер-диски для магнито-оптической памяти и изготовлена станция записи, которая проработала в этой организации много лет. В дальнейшем были освоены новые материалы для оптической записи: фоторезист, аморфный кремний и LDV-стекла. Эти работы, выполненные В.П. Корольковым, позволили создать новые классы полутонковых и рельефных дифракционных элементов.

С начала 90-х гг. контракты с отечественной промышленностью прекратились, но нам помогли наши старые научные связи с научными центрами Германии, Италии, США. В это трудное время (1994-1997 гг.) мы получили экспортные заказы на изготовление ЛЗС для Италии, Германии (2шт) и Китая, которые успешно выполнили совместно с КТИ научного приборостроения. Начиная с 1994 г. наша лаборатория тесно сотрудничает с Стюардсовской обсерваторией университета Аризоны, США. Разработанная у нас термохимическая технология записи была применена там для изготовления самых больших в мире синтезированных голограмм диаметром до 2 м. В нашей лаборатории разработаны методы запи-

си и изготовлены высокоточные синтезированные голограммы для контроля асферических зеркал гигантских телескопов с диаметром в 2,4; 3; 6,5 и 8,4 м. Разработанные у нас методы формирования волновых фронтов с помощью дифракционных элементов позволили контролировать форму асферических поверхностей многометровых зеркал с точностью 10-20 нм на расстоянии в несколько метров.

Установка «Видеодиск» стала одним из основных мест показа достижений института. Ее демонстрировали ряду VIP персон.

Президент Академии наук СССР академик А.П. Александров после того, как его попросили написать несколько слов на память, стал писать, но в это время академик Ю.Е. Нестерихин ему сказал, что эта записка будет коллективу в виде премии. Александров возмутился и написал: «Это вам не вместо премии, а вместе с премией» и поздравил наш коллектив. Уходя из лаборатории он долго ворчал на Нестерихина и спрашивал как он мог так некрасиво сказать. Премия, правда, все равно не дали.

Основатель цифровой голографии профессор А. Ломан (ФРГ) написал: «Ваша машина с ее точным интерферометрическим управлением и гибким компьютерным контролем великолепна. Материал, выбранный для записи, тоже хорош. Вы можете создать множество очень полезных плоских оптических элементов. Удачи вам!»

Профессор М. Франсон (Франция) отметил: «Мое посещение оптической лаборатории Института автоматизации было весьма интересным для меня, особенно метод изготовления киноформных элементов».

Профессор Г. Арсено (Канада): «Я поражен вашей машиной для изготовления киноформов, и не только вследствие ее огромной полезности, но и потому, что свет используется для создания элементов, преобразующих свет. Обработка материалов светом приносит духовное удовлетворение. Возможно, Микеланджело света появится именно в вашей лаборатории...».

Профессор университета Аризоны Джим Берч после визита в лабораторию оставил такую записку:

I am very grateful for the opportunity to visit Academgorodok and work with the scientists from the Institute of Automation and Electrometry. The advanced technologies for hologram fabrication that were developed there and the high quality diffractive elements manufactured there have been very important for the 6- and 8-meter telescope projects at Steward Observatory.

Professor Jim Burge
University of Arizona,
Tucson, USA

Jim Burge 07.03.98

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА

На рис.6 показаны разработанные в лаборатории лазерных технологий методы изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным (а) и пилообразным (б) профилем.

Создание рельефа с прямоугольным профилем (рис.6а) начинается с нанесения тонкой пленки хрома толщиной примерно 50 - 80 нм на поверхность оптической пластины. Далее на этой пластинке проводится запись необходимой структуры сфокусированным пучком мощного лазера. Известно, что лазерное излучение можно сфокусировать в пятно с размером порядка длины волны света и получить в нем гигантскую плотность мощности - тысячи мегаватт на квадратный сантиметр. Расположенное в фокусе вещество практически мгновенно нагревается до температуры в несколько сотен и тысяч градусов. При таких быстрых перепадах температур многие вещества ведут себя иначе. Мы установили, что аморфные пленки хрома после воздействия излучения меняют свою структуру, а на их поверхности образуется тонкий слой окислов хрома. Управляя от компьютера перемещением лазерного пятна и мощностью лазерного излучения, можно создать в пленке хрома скрытое изображение. Мы назвали эту технологию записи - термохимической. На следующем этапе скрытое изображение проявляется в селективном проявителе: чистый хром быстро растворяется, а экспонированные участки - остаются. Таким образом формируется микроструктура из хрома на поверхности пластины. Для получения рельефа в стекле проводится реактивное ионное травление в плазме фтора. Ионы фтора быстро разрушают стекло, почти не трогая хром. После получения рельефа нужной глубины остатки хрома стравливаются, и дифракционный элемент готов. Достоинство этой технологии в том, что хром можно нанести на поверхности практически любых размеров с очень хорошей равномерностью и дифракционная структура формируется точно в тех местах, где было воздействие лазерного излучения. Таким путем нам удается получить рельеф с минимальными размерами в доли микрона.

Лазерная технология создания рельефа с пилообразной и любой другой формой поверхности представлена на рис. 6б. На первом этапе на пластину наносится тонкая пленка органического фоторезиста толщиной 1-2 мкм. Фоторезист обладает свойством изменять скорость растворения в проявителе почти в линейной зависимости от величины экспозиции: т.е. меняя величину экспозиции, можно

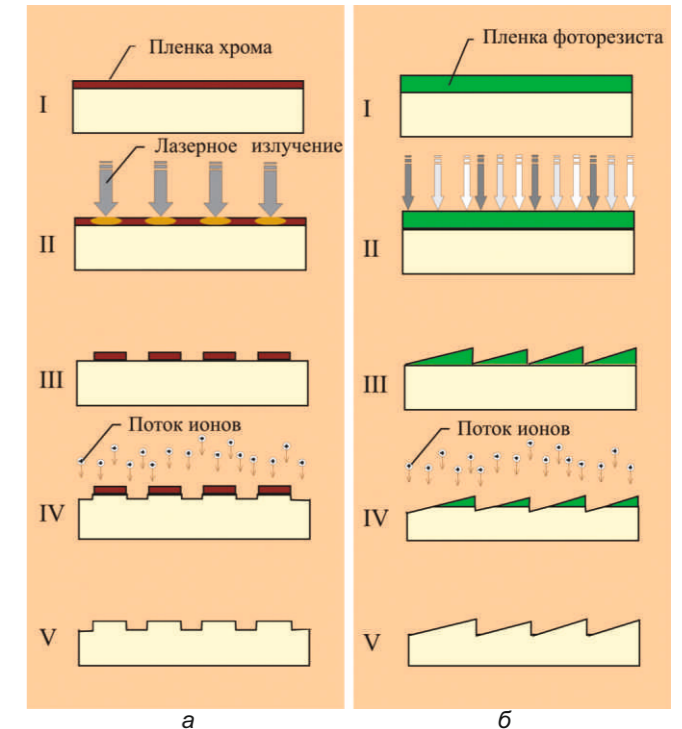


Рис. 6. Технологии изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным (а) и пилообразным (б) профилем.

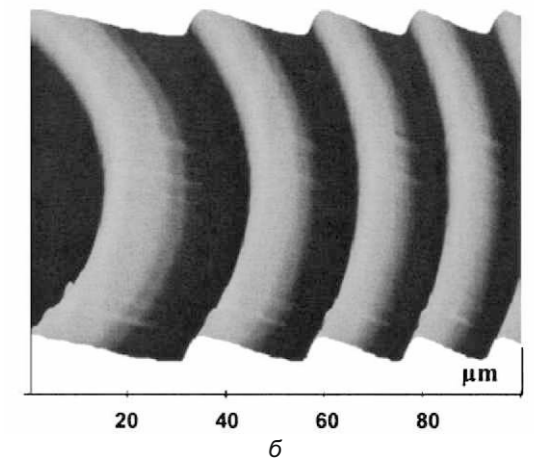
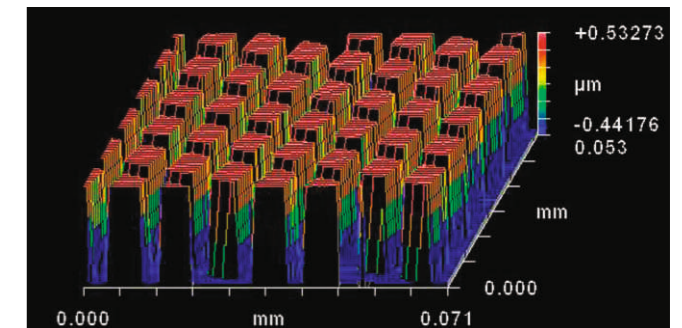


Рис.7. Примеры поверхностей дифракционных элементов с бинарным (а) и пилообразным (б) профилем, изготовленные методами прямой лазерной записи в ИАиЭ.

изменить толщину пленки. Поэтому, для формирования рельефа, поверхность пленки экспонируется движущимся сфокусированным лазерным пучком (диаметр пятна около 0,6 микрона, длина волны 455 нм), причем мощность излучения меняется по заданному закону. После проявления в пленке образуется рельеф с заданной формой. На последнем этапе проводится реактивное ионное травле-

ние и ионы фтора переносят рельеф из пленки фоторезиста в материал пластины. Скорости ионного травления фоторезиста и стекла немного отличаются, но это учитывается при выборе экспозиции. Примеры такого рельефа показаны на рис. 7. Дифракционные элементы, работающие в видимом диапазоне, имеют максимальную глубину рельефа 1 - 1,3 микрона.

СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОО

Наиболее ответственный и общий момент описанных выше технологий - это экспонирование поверхности светочувствительной среды (пленки хрома или фоторезиста) сфокусированным до размеров в доли микрона лазерным пучком. Для того чтобы изготовить ДОО (его размеры могут достигать в поперечнике десятков сантиметров) за реальное время (несколько часов), скорость движения пучка относительно подложки должна быть достаточно высокой - десятки метров в секунду. За это время сфокусированный пучок должен успеть просканировать всю площадь элемента. Кроме того, изменение мощности пучка должно быть точно синхронизовано с координатами изготавливаемого элемента. Рассогласование не должно превышать нескольких нанометров, а минимальный размер микроструктуры - десятых долей микрона. Эти противоречивые требования были впервые реализованы в ЛЗС, разработанной в ИАЭ. Большинство оптических систем обладает вращательной симметрией относительно оптической оси, поэтому нами было предложено вести запись структуры ДОО в полярной системе координат. Согласно этой концепции, при изготовлении элемента подложка со светочувствительным материалом непрерывно вращается, в то время как записывающий луч медленно движется в радиальном направлении.

ЛЗС с горизонтальной осью шпинделя. ЛЗС первого поколения (рис. 8) была создана в ИАиЭ в начале 1980-х гг. 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 относительно записывающего луча. В качестве источника излучения использовался первоначально He-Ne лазер, а затем аргоно-

вый. Излучение лазера ($\lambda = 457-514$ нм) через акусто-оптический модулятор поступало к фокусирующему микрообъективу ($40\times, 0,65$). 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. Интерферометр совместно с системой управления линейным двигателем обеспечивал дискретность радиального позиционирования записывающего пятна света, равную 0,078 мкм. Управление и контроль работы всех блоков системы осуществляла ЭВМ. Оптико-механический блок был собран на чугунной плите. В 1980-х гг. на этой ЛЗС были изготовлены ДОО диаметром до 200 мм и минимальными размерами структуры, равными 1,0 - 1,5 мкм. Точность выполнения топологии рисунка составляла 0,3 мкм (средне-квадратическое значение).

ЛЗС с вертикальной осью шпинделя. В 1994 г. в лаборатории была разработана и создана ЛЗС нового поколения. Она стала прототипом коммерческой версии, названной CLWS-300С, разработанной нами совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН. Системы CLWS-300С до настоящего времени успешно работают в нескольких лабораториях Европы. Упрощенная блок-схема системы представлена на рис. 9. Принцип работы аналогичен ЛЗС с горизонтальным положением оси вращения шпинделя. Главные отличия состоят в следующем:

- ось азростатического шпинделя имеет вертикальное расположение;
- механические и оптические блоки смонтированы на массивном гранитном основании размером 1.5x2м;
- повышена точность позиционирования линейной координаты до значений 5-10 нм;

- повышена точность угловой координаты до 1 угл. сек.;
- создана программа преобразования координат, позволяющая осуществлять запись произвольных структур, заданных в прямоугольной системе координат;
- расширен перечень материалов, в которых можно вести запись (фоторезисты, аморфный кремний, LDW-стекла).

Возможности новой записывающей системы иллюстрируют тестовые микроизображения, приведенные на рис. 9б. Они показывают, что при круговой развертке минимальные размеры формируемых фрагментов линейных структур меньше диаметра записывающего пятна, равного в нашем случае 0,8 мкм.

На рис. 10 показан внешний вид установки CLWS-300С, поставленной по контракту в Институт технической оптики Штутгартского университета, Германия.

В 2002-2005 гг. в лаборатории была разработана принципиально новая ЛЗС «третьего поколения» CLWS-200 (рис.11). Нам удалось уменьшить габариты установки до размеров 0.65x0.9м при диаметре вращающегося стола в 220 мм. Компоновка оптико-механического блока была полностью изменена. Было создано новое программное обеспечение. Особое внимание уделялось уменьшению всех источников погрешностей при позиционировании записывающего лазерного пучка. Установка CLWS-200 была поставлена в Самарский государственный аэрокосмический университет.

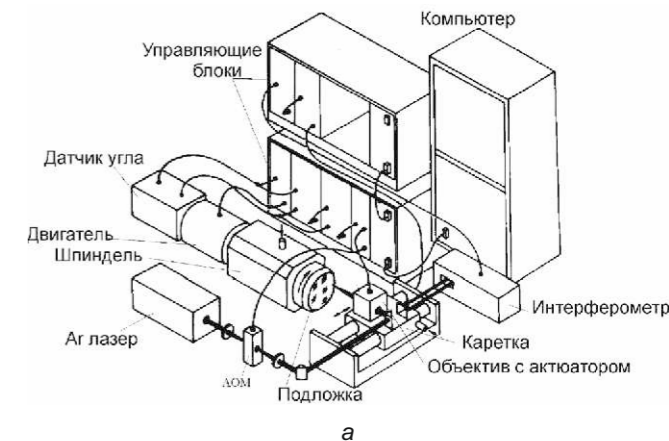


Рис. 8. Блок-схема (а) первой лазерной записывающей системы, разработанной в ИАиЭ СО РАН и фотография (1985 г.) ее внешнего вида (б).

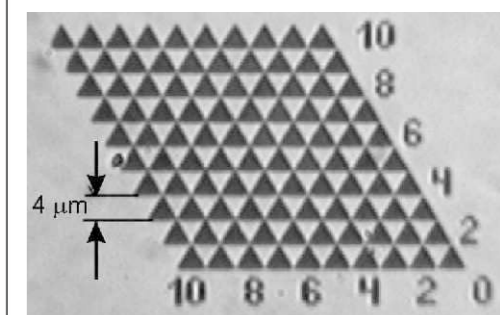
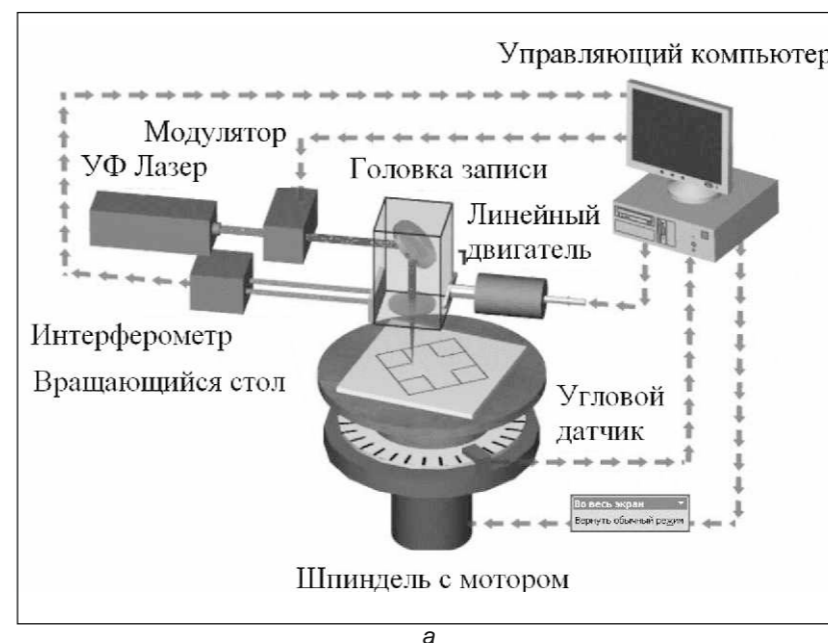


Рис. 9. Функциональная схема установки CLWS-300 (а) и пример тестовой структуры, записанной на пленке хрома методом лазерной термохимии (б).



Рис. 10. Внешний вид установки CLWS-300C в Институте технической оптики Штутгартского университета, Германия (1995 г.).

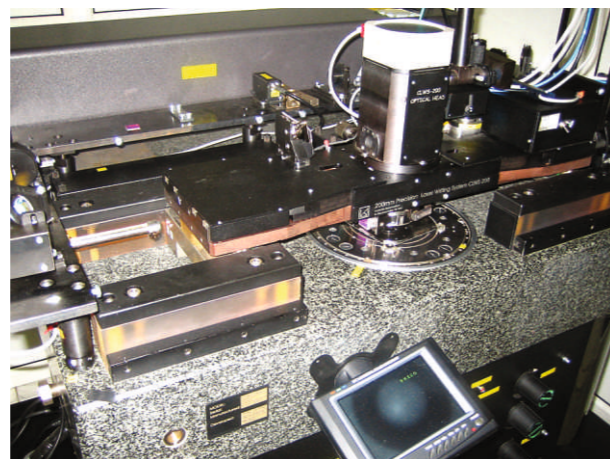


Рис. 11. Установка лазерной записи CLWS-200. Поле записи 220 мм, скорость вращения шпинделя до 15 об/сек, минимальная ширина записываемой линии 0,6 мкм, точность позиционирования 50 нм. Материалы для записи: тонкие пленки хрома, кремния, фоторезиста.

Разработанные в лаборатории лазерных технологий ЛЗС и технологии позволили синтезировать новые дифракционные оптические элементы и создать на их основе оптические системы: двухфокусный микроскоп, прибор для определения плоскостности и прямолинейности («лазерная струна»), интерферометры перемещений, интерферометры для контроля

сферических, асферических и плоских оптических компонентов и др.

Из широкого спектра новых систем мы выбрали два полярных примера применения ДОЭ: это дифракционные элементы для контроля самых крупных оптических систем созданных человеком - телескопов и самых маленьких - искусственных хрусталиков глаза.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПОВ

Телескопы остаются в настоящее время самым мощными инструментами познания Вселенной. Создание Галилеем в 1609 г. первого телескопа сразу принесло множество открытий. Первый телескоп имел диаметр 5 см. За четыре столетия (скоро юбилей!) размер зеркал телескопов достиг 10 м, и уже запущены проекты создания гигантских телескопов с

размером зеркал в 30, 50 и 100 м! Такие телескопы, базируясь на земле (атмосферные турбулентности уже научились компенсировать), позволят разглядеть на Луне предмет размером в мяч, различить планеты земного типа у ближайших звезд и раскрыть тайну «черной материи».

Однако оказалось, что изготовить гигантское зеркало мало, надо его тщательно проверить. Иначе огромный труд (и деньги) будет потерян (такие зеркала изготавливаются по несколько лет и стоят миллионы долларов). Параболическая поверхность зеркала телескопа должна быть выполнена с точностью в сотые доли микрона. Другими словами, если увеличить 8-метровое зеркало до размеров Черного моря, рябь поверхности должны быть менее 1 мм. Для обработки поверхности зеркала нужен эталон, с которым бы оптики постоянно сравнивали бы результаты своего труда. Оказалось, что ДОЭ, обладающие свойством преобразовывать форму волнового фронта, идеально подходит для этой цели.

В лаборатории лазерных технологий исследовались два основных варианта контроля асферических зеркал. Согласно первому варианту (рис. 13а), ДОЭ непосредственно пре-



Рис. 12. Один из первых телескопов.

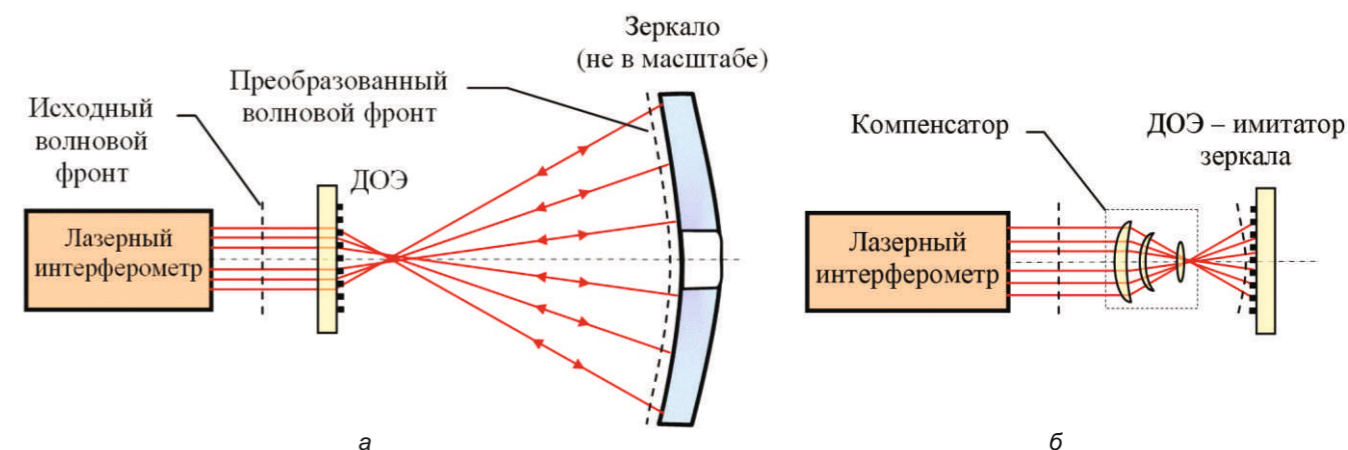


Рис. 13. Оптические системы для измерения формы поверхности зеркал: ДОЭ выполняет роль компенсатора (а) и ДОЭ выполняет роль имитатора зеркала (б).

образует форму исходного волнового фронта лазерного интерферометра в асферический волновой фронт, который точно соответствует форме поверхности зеркала. Оптический прибор - интерферометр, измеряет разность между этим фронтом и поверхностью зеркала в долях длины волны света.

Согласно второму варианту (рис. 13б), преобразование волнового фронта производилось многолинзовой системой (компенсатором), а вместо большого контролируемого зеркала, для калибровки, ставится его имитатор - отражательный ДОЭ относительно небольшого размера. Дифракционная структура этого элемента отражала световой поток назад точно так, как это делало бы идеальное зеркало. В процессе работы оптики поочередно могут сравнивать форму полируемого зеркала с эталоном, кото-

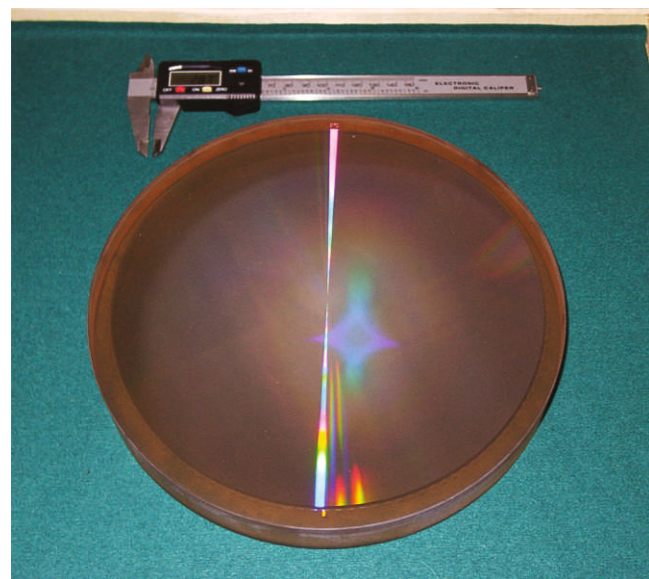
рым является имитатор.

Метод контроля астрономических зеркал с применением ДОЭ был разработан относительно недавно и сейчас применяется при создании всех больших зеркал. Толчком к его применению послужила история с космическим телескопом Хаббл, когда 2,4-метровое зеркало было отполировано без применения имитатора, в результате чего форма его поверхности всего на 0,5 микрона стала отличаться от заданной. Но это в 10 раз ухудшило разрешающую способность данного телескопа. Понадобилась специальная экспедиция в космос на корабле Шаттл, для ремонта этого телескопа.

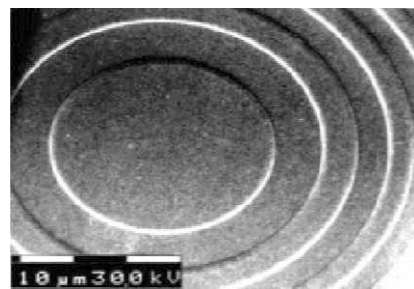
Особенностью ДОЭ для контроля больших астрономических зеркал, является их большие размеры - до 250 мм при минимальных размерах дифракционной структуры около



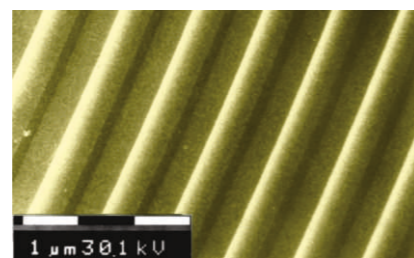
Рис. 14. Сотрудники лаборатории с дифракционными элементами для контроля астрономических зеркал, изготовленными по контракту с Университетом Аризоны (декабрь 2002 г.).



а



б



в

Рис. 15. Внешний вид 210-мм ДОЭ для проверки 8,4-метрового зеркала ББТ (а) и микрофотографии его дифракционной структуры: зоны в центре с размером ~ 8 мкм (б) и крайние зоны ~ 0,6 мкм (в).



а



б

Рис. 16. Большой бинокулярный телескоп (2 зеркала $f/1.14$ диаметром 8,4 м) перед вводом в эксплуатацию (а) и первое изображение, полученное этим телескопом (галактика NGC891, 12 октября 2005 г.) (б).

0,5 мкм. Причем все зоны на поверхности такого ДОЭ должны быть нанесены с погрешностью менее 50 нм (рис. 14 и 15).

Предложенный в лаборатории метод записи дифракционных структур позволил создать ДОЭ для контроля любых зеркал, как существующих, так и проектируемых. В лаборатории лазерных технологий ИАиЭ изготовлены ДОЭ для контроля 6,5 и 8,4 метровых зеркал телескопов Магеллан и Большой бинокулярный телескоп (ББТ), созданный в Стюардсовской обсерватории Университета Аризоны, г.Туссон, Аризона, США. ДОЭ позволили выявить и устранить ошибки при полировке этих зеркал. Оба этих телескопа уже приняты астрономами в эксплуатацию и дали первый свет (рис. 16).

ГИБРИДНЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ХРУСТАЛИК ГЛАЗА

Для замены пораженной катарактой естественной линзы глаза (рис. 17) ежегодно имплантируется несколько миллионов интраокулярных линз (ИОЛ). Имплантация ИОЛ после удаления пораженного хрусталика является сегодня самым эффективным средством современной хирургии глаза. В мировой практике для восстановления зрения используют однофокусные рефракционные линзы. Проблема аккомодации (т.е. ясного зрения на различных расстояниях) не решается обычными линзами. Применение гибридных (дифракционно-рефракционных) линз, формирующих одновременно изображения ближних и дальних предметов, позволяет создать условия псевдоаккомодации. Клинические испытания показывают, что после имплантации гибридных ИОЛ можно отказаться от очков, т.е. практически полностью восстановить функции нормального глаза для людей пожилого возраста.

Каким образом устроена гибридная ИОЛ? Она состоит (рис. 18) из традиционной рефракционной линзы (плоско выпуклой или двояковыпуклой), на одну из поверхностей которой наносится специальная дифракционная микроструктура в виде круговой дифракционной решетки, представленной нами на рис. 4. Такая микроструктура с определенным образом выбранной высотой имеет два основных дифракционных порядка: «0» и «+1». В нулевом порядке дифракции зонная пластинка не обладает оптической силой, и рефракционная линза формирует на сетчатке изображения объектов, расположенных на дальних расстояниях от глаза. В +1 порядке зонная пластинка создает дополнительную оптическую силу, и хрусталик способен сфокусировать на сетчатку ближние объекты. Гибридная ИОЛ формирует два фокуса одновременно всей поверхностью и не возникает опасности потери бифокальности в зависимости от диаметра зрачка.

Современным оперативным методом удаления катаракты является **фактоэмульсификация**. Суть процедуры заключается в том, что с помощью ультразвука помутневший хрусталик превращается в эмульсию, которая через специальный зонд выводится из глаза (рис. 19). На его место имплантируется мягкая интраокулярная линза, сворачиваемая перед имплантацией. Все манипуляции при такой операции осуществляются через микроразрез (2-3 мм), который самогерметизируется и не требует наложения швов. Эффективность метода подтверждает тот факт, что зрение пациента после имплантации искусственного

хрусталика начинает восстанавливаться уже на операционном столе. В связи с этим произошел переход на ИОЛ, изготовленные из мягких полимеров на основе гидрогелей, силикона и других материалов, обладающих высокой биосовместимостью.

Внешний вид разработанной в лаборатории лазерных технологий матрицы для изготовления искусственного хрусталика глаза и гибридной двухфокусной ИОЛ представлен на рис. 20. Материалом для линз служит эластичный полимер - олигокарбонат/метакрилат. Он невосприимчив к биологическим отложениям на острых краях профиля микроструктуры



Рис. 17. Вид глаза, пораженного катарактой.

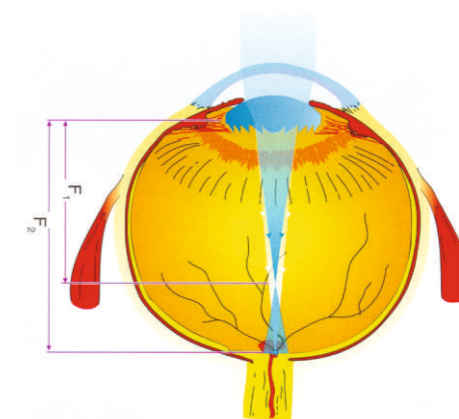


Рис. 18. Глаз человека с имплантированной ИОЛ.

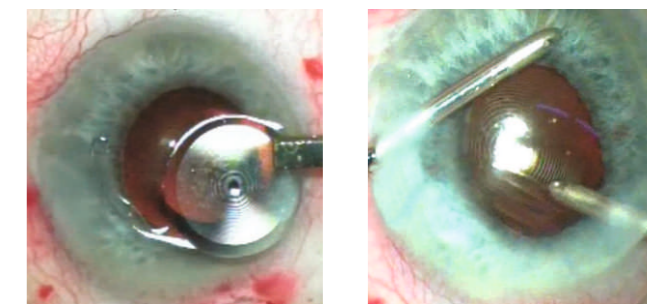
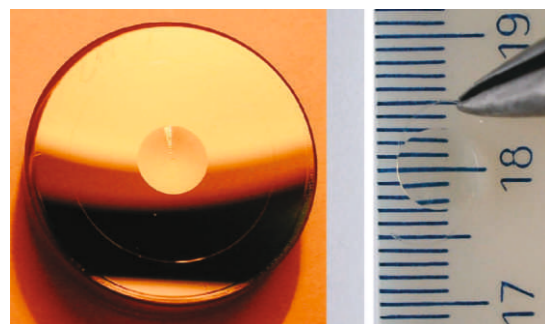
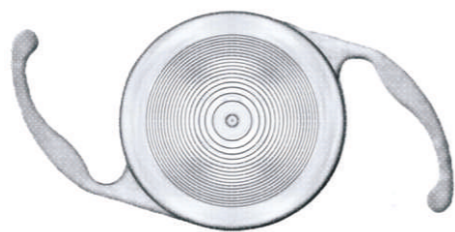


Рис. 19. Этапы операции по имплантации гибридного искусственного хрусталика глаза в Новосибирском филиале МНТК «Микрохирургия глаза».



а



б

Рис. 20. Матрица для изготовления искусственного хрусталика глаза (а) и гибридная интраокулярная линза «Аккорд» (б). Тиражирование линзы осуществляется в НПП «Репер» (г. Нижний Новгород).

линзы. Дифракционная микроструктура нанесена на всей поверхности ИОЛ, и учтено влияние резких переходов между зонами. Дифракционной структуре приданы дополнительные функции: корректора симметричных и асимметричных aberrаций роговицы, рефракционной линзы и стекловидного тела. Для уменьшения вероятности биологических отложений на перепадах глубины микрорельефа сформированы пологие скаты между зонами и в центре введена мини-зона, совпадающая с базовой поверхностью, что позволяет избежать боковых засветок в ночное время. Матрица для изготовления искусственного хрусталика глаза выполнена методом прямой лазерной записи (рис. 6б). Тиражирование линзы осуществляется в НПП «Репер» (г. Нижний Новгород).

Разработанные нами линзы проходят в настоящее время первую стадию клинических испытаний в Новосибирском филиале МНТК «Микрохирургия глаза». Клиническое исследование включает факоэмульсификацию, имплантацию ИОЛ с использованием инъекторной системы. Линза имплантирована в хрусталик

глаза нескольким десяткам пациентов. Послеоперационное исследование зрительных функций показало, что все пациенты хорошо видят дальние объекты и могут читать газету, не применяя очки. Острота зрения вдаль - в пределах 0,8 - 1,0, острота зрения вблизи - не менее 0,7. Ряду пациентов ИОЛ были имплантированы в оба глаза с целью устранения дальновзоркости.

Завершая обзор работ, выполненных в лаборатории лазерных технологий, отметим несколько ключевых моментов, важных для развития дифракционной оптики.

1. Создание ЛЗС стимулировало исследовательские работы, направленные на разработку новых технологий синтеза дифракционных структур. Изготовление элементов в полярной системе координат оказалось продуктивным и выявило ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными х-у системами. Точность воспроизведения формы волнового фронта дифракционными элементами достигла $\lambda/20$, что соответствует наивысшим стандартам классической оптики.

2. Значительным стимулятором работ стала разработка в лаборатории термохимической технологии изготовления компонентов дифракционной оптики в тонких пленках хрома. Данная технология отличается исключительной простотой и воспроизводимостью в сочетании с высоким качеством получаемых микроизображений.

3. Разработан метод записи прецизионных ДОО - «синтетических пробных стекол», предназначенных для контроля асферической оптики, с гарантированной точностью. Ошибки асферического волнового фронта не превышают $\lambda/20$ для оптических систем с апертурой $f/1$.

4. ИАиЭ СО РАН совместно с Новосибирским филиалом МНТК «Микрохирургия глаза», компаниями «Репер-НН» и «ИнтраОЛ» разработана и испытана новая бифокальная интраокулярная линза «МИОЛ-Аккорд». Работа доведена до клинических испытаний.



Рис. 21.

Коллектив разработчиков ИОЛ (лаборатория лазерных технологий).



В. П. Корольков



Ю. И. Юрлов



Д. Э. Денк



В. В. Донцова



Б. В. Драчков



В. А. Попков



Г. А. Ленкова



А. И. Лохматов



А. И. Малышев



А. Е. Маточкин



Н. С. Сергеева



В. В. Черкашин



Л. П. Филипченко



Г. Г. Тарасов



А. Г. Седухин



1-ряд сверху: Д.Э. Денк, Р.В. Шиманский, Ю.Ф. Стусь, А.Г. Полещук, Б.В. Драчков, В.В. Черкашин, А.Г. Седухин.

2-й ряд сверху: А.И. Малышев, Н.С. Сергеева, Г.А. Ленкова, В.П. Коронкевич, И.А. Михальцова, А.Е. Маточкин, Г.Г. Тарасов, Ю.И. Юрлов.

Нижний ряд: Л.П. Филипченко, В.П. Корольков, А.И. Лохматов, В.В. Донцова, М.М. Мызник.