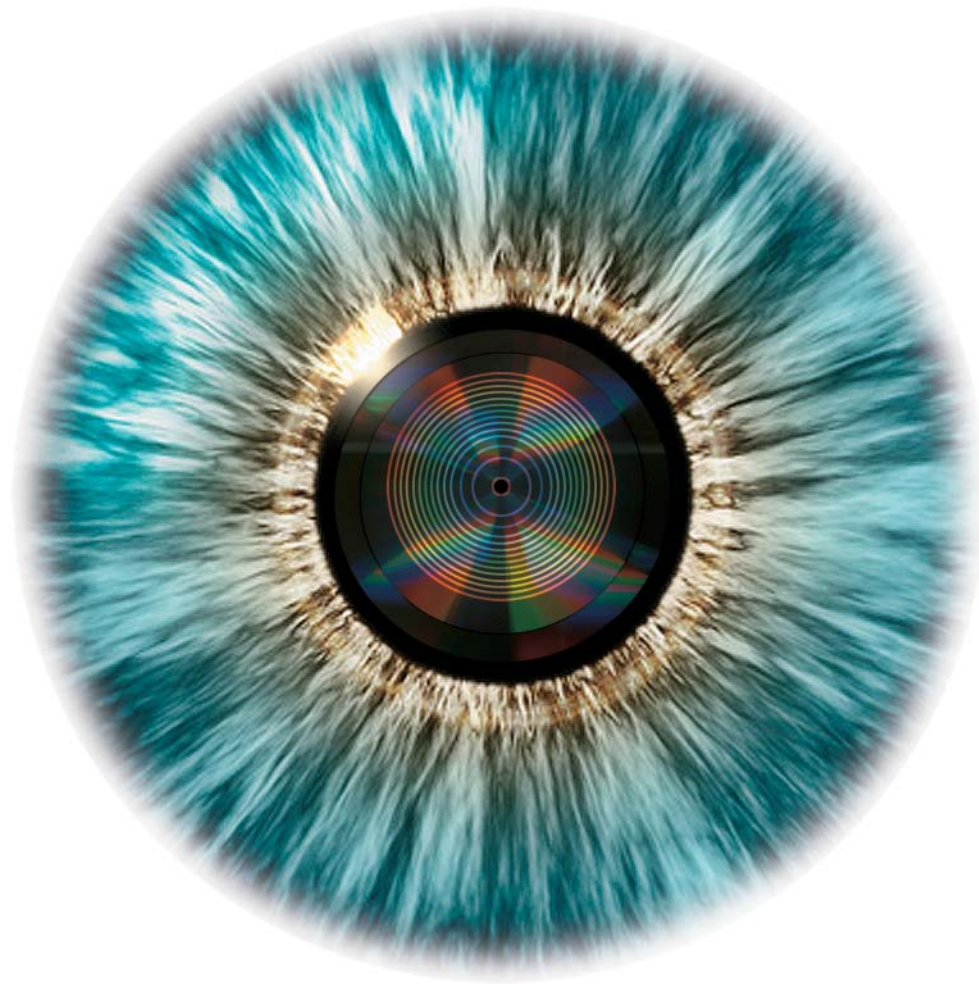


А.Г. ПОЛЕЩУК, В.П. КОРОНКЕВИЧ



НОВЫЙ ОБЛИК ОПТИКИ

ПОЛЕЩУК Александр Григорьевич — доктор технических наук, заведующий лабораторией лазерных технологий Института автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск)

КОРОНКЕВИЧ Вольдемар Петрович — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск)

*Очарован внезапно прелестью.
Елки, думаешь, где ж это, братцы, я?
И стоишь так с отвисшею челюстью,
Но потом понимаешь: ДИФРАКЦИЯ!*
Игорь Иртеньев, «Пастораль II»

В основе обычной, классической оптики лежат законы отражения и преломления света. Основу ее составляют линзы, призмы, зеркала — оптические элементы, давно достигшие предела совершенства. Классическая оптика основывается на законах отражения и преломления света. Оптические элементы, составляющие ее базу — призмы, линзы, зеркала — давно достигли пределов совершенства. Дальнейшее развитие оптики связывают с элементами, отличительной особенностью которых является использование явления *дифракции* света на микро- и наноструктурах.

Дифракционная оптика (ее еще называют компьютерной, бинарной, плоской, голографической оптикой) — порождение века информационных технологий. Она обязана своим возникновением таким инструментам, как лазер и компьютер: создание дифракционных микроструктур потребовало применения специальных материалов и новых технологий формообразования поверхности. За последние двести лет оптики научились изготовлять лишь один дифракционный элемент — дифракционную решетку для спектральных приборов, для чего были созданы высокоточные механические гравировальные машины. Оборудование же для производства дифракционных элементов с произвольной топологией поверхности появилось только сегодня.

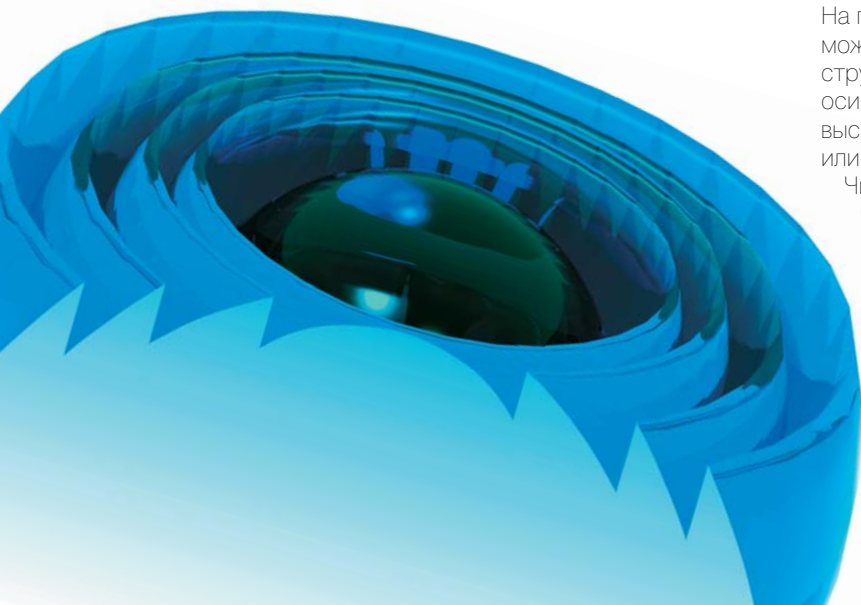
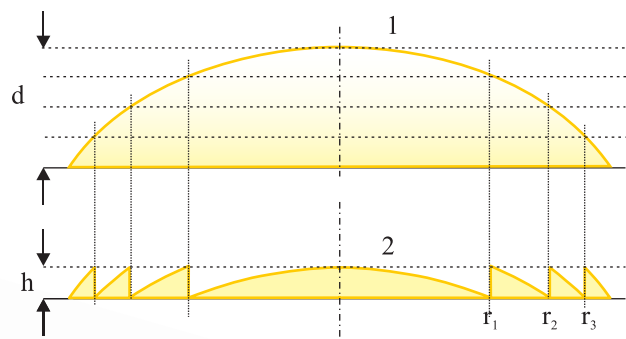
Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) и голограммы незаметно, но уверенно входят в нашу жизнь. Когда в магазине кассир считывает код с товаров, он пользуется лазерным устройством, где ДОЭ выполняет одновременно несколько функций: формирует лазерный пучок, направляет его на штриховой код и собирает отраженное излучение на фотоприемник. Так называе-



мая «лазерная игла» проигрывателей компакт-дисков содержит дифракционную линзу, помогающую сформировать световой пучок, размером не превышающий доли микрона. Дифракционные элементы широко используются в измерительной технике, оптике лазеров, военной технике.

Голограммы, играющие всеми цветами радуги, защищают от подделки, сопровождая ценные бумаги, банкноты, визы в паспорте и фирменные знаки. Выпускаются специальные голографические почтовые марки, создающие объемное изображение. Появились книги с иллюстрациями, где цвет возникает за счет разложения белого света после отражения от рельефной дифракционной отражательной решетки. В повседневную практику вошли так называемые «голографические ключи», содержащие биометрические данные хозяина квартиры или офиса. И подобных примеров примене-

Человеческий глаз воспринимает электромагнитное излучение с длиной волн от 400нм (фиолетовый свет) до 750нм (красный свет). При взаимодействии со структурой дифракционного элемента световая волна испытывает отклонение — возникает явление дифракции. Если световое излучение имеет несколько длин волн («белый» свет), то, проходя или отражаясь от дифракционного элемента, оно разлагается в спектре в виде радуги



Преобразование плоско-выпуклой линзы в киноформную линзу

Обычную плоско-выпуклую линзу (1) можно геометрическим способом преобразовать в тонкую дифракционную структуру (2). Для этого линзу делим на тонкие слои одинаковой толщины $h = N\lambda/(n - 1)$, где λ — длина волны света, n — коэффициент преломления материала линзы, N — целое число. Число слоев может быть различным: например, если исходная линза имеет толщину $d=5$ мм, то при $\lambda=0,5$ мкм, $N=1$ и $n=1,5$ (стекло) число слоев толщиной 1 мкм будет равно 5000. На плоской поверхности различные слои можно объединять в дискретную ступенчатую структуру линиями, параллельными оптической оси. Полученная структура с максимальной высотой h и будет называться дифракционной или киноформной линзой. Число зон с радиусами $r_1 \dots r_k$ в линзе будет равно числу слоев, а их ширина будет уменьшаться к периферии

Трехмерная модель киноформной линзы

Справа — сложный многолинзовый объектив и превосходящая его по качеству фокусировки тонкая дифракционная линза, изготовленная в ИАиЭ СО РАН

ния новых оптических элементов с каждым днем становится все больше и больше...

Потенциальные возможности широкого применения дифракционных элементов до последнего времени сдерживались отсутствием технологий создания поверхностного микрорельефа, имеющего минимальные размеры около половины микрона и сложную трехмерную форму, при том что общие размеры элементов могут достигать метров в диаметре. Поэтому методы изготовления ДОЭ существенно отличаются от методов изготовления тех же микросхем.

Дифракция — дело тонкое

Принципы работы дифракционных оптических элементов и их отличия от обычных, рефракционных, удобнее всего рассмотреть на



Фотография лазерного пятна, сфокусированного дифракционной линзой с числовой апертурой $NA=0,65$

Д. Габор: «Будущее нельзя предвидеть, но можно изобрести»

Периодические решетки всегда вызвали большой интерес, поскольку их способность разлагать свет в спектр сделала их мощным аналитическим инструментом физиков. Само явление дифракции было обнаружено давно, но первую дифракционную решетку изготовил в 1785 г. американский астроном Д. Риттенхауз, навив волос между двух винтов с очень мелкой резьбой.

Почти через 40 лет ее заново «изобрел» немецкий физик Дж. Фраунгофер. Будучи прекрасным механиком, он создал первую механическую машину для нарезания периодических решеток с помощью алмазного резца в тонком слое золота, нанесенном на поверхность стеклянной пластины. Его решетки были так хороши, что он смог измерить линии поглощения в солнечном

спектре (линии Фраунгофера). Технология дифракционной оптики развивалась в те годы в основном для нужд спектроскопии, хотя в 1875 г. Ж. Соре создал кольцевую дифракционную решетку, позволявшую фокусировать до 10% световой энергии.

«Отец» современных дифракционных решеток американец Г. Роуланд в конце XIX в. сконструировал серию гравировальных машин для нарезания дифракционных решеток с периодом до 1,5 мкм и размером до 18 см. Он же изготовил первые дифракционные решетки на сферических поверхностях, выполняющие одновременно роль решетки и фокусирующей линзы.

В 1955 г. Дж. Харрисон впервые применил интерферометр (измерительный прибор, использующий явление интерференции волн) для контроля перемещения алмазного резца. Координату резца стали измерять в долях длины волны монохроматического света, что

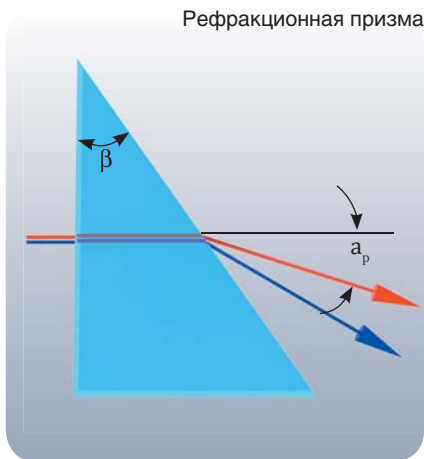
позволило компенсировать вибрации и ошибки механической системы станка. Такая сверхточная обработка оптических поверхностей широко используется и в настоящее время.

В 1948 г. венгр, будущий нобелевский лауреат Д. Габор предложил метод оптической голографии — метод записи, воспроизведения и преобразования волновых полей, основанный на интерференции и дифракции световых волн. Использование лазера для записи голограммы натолкнуло на идею использовать ее в качестве оптического элемента, преобразующего лазерное излучение.

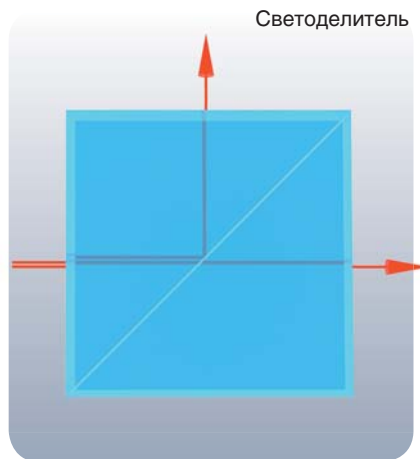
В 1960-х гг. была разработана технология изготовления дифракционных решеток, основанная на создании периодического распределения интенсивности в специальных фотоматериалах в результате интерференции лазерного излучения. Такие голографические решетки очень высокого качества получили широкое распространение.

Однако оптическая голография позволяла создавать голограммы только реально существующих объектов. Но поскольку голограмма, запечатленная на фотопленке, есть не что иное, как неоднородное почернение фотоэмульсии, то последнее можно создать искусственно, т.е. синтезировать голограмму, рассчитав ее структуру с помощью компьютера. Эта идея была впервые предложена и реализована немецким физиком А. Ломаном в 1966 г.

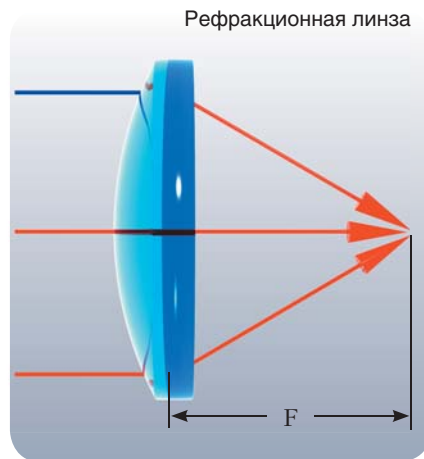
Уже через три года специалисты фирмы IBM, используя современную по тем временам вычислительную технику, создали фокусирующий дифракционный элемент с непрерывным профилем и назвали его «киноформ». А еще через год были проведены первые эксперименты по созданию ДОЭ с использованием технологий микроэлектроники, начавшей в то время бурно развиваться.



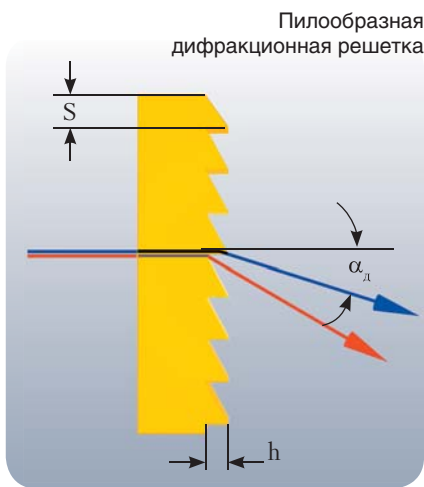
Призма отклоняет световой пучок на угол $\alpha_p = \beta(n-1)$, причем у большинства оптических материалов коэффициент преломления увеличивается с уменьшением длины волны: пучок синего света отклонится больше, чем красный. Аналог призмы — дифракционная решетка с пилообразной формой рельефа — отклоняет свет на угол $\alpha_d = \lambda/s$ (s — период решетки)



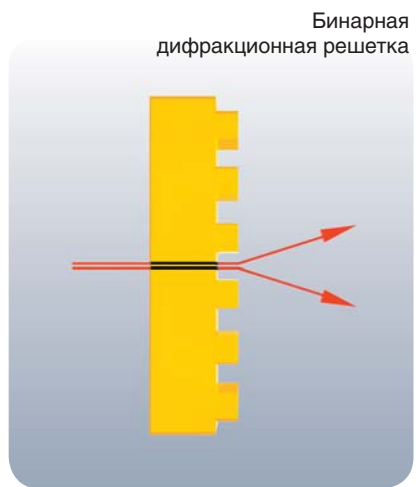
Если рельеф дифракционной решетки имеет прямоугольную форму и глубину, в два раза меньшую, чем у пилообразной решетки, световой пучок разделится в основном на два, равных по интенсивности. Можно подобрать такую форму рельефа, что дифракционный элемент будет делить входной световой пучок на любое заданное число пучков



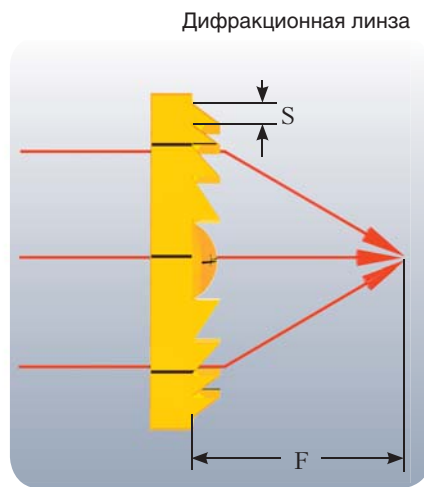
Дифракционная линза является не просто аналогом обычной рефракционной линзы, а имеет существенное преимущество: она фокусирует световой пучок в пятно, определяемое только дифракцией на ее апертуре, т. е. свободна от aberrаций и может заменить сложный многолинзовый объектив. Фокусное расстояние (F) дифракционной линзы диаметром D можно оценить по формуле: $F = DS_{\text{mir}}/2\lambda$



а



б



в

Простейшие преобразования световых пучков, выполняемые рефракционными (верхний ряд) и дифракционными (нижний ряд) оптическими элементами, — отклонение (а), светоделение (б) и фокусировка (в)

примере линзы — базового элемента как классической, так и дифракционной оптики. Линза предназначена для фокусировки света и построения изображений объектов, т. е. для геометрических и волновых преобразований световых пучков. Например, входящий параллельный пучок (плоскую волну) она преобразует в сходящийся пучок (в сферическую волну).

Между дифракционной и классической конфигурациями линз имеется ряд существенных различий. Во-первых, в обычной линзе длина оптического пути от любой точки объекта до его изображения является постоянной (принцип Ферма). Линза работает за счет явления рефракции на ее поверхности. Условно линзу можно представить как совокупность призм с разными углами, возрастающими от центра к периферии, поэтому различны и углы преломления световых лучей, попадающих на каждую из призм.

В дифракционной линзе длина оптического пути на границах зон претерпевает скачки, равные $N\lambda$ (где N — целое число). Она работает за счет явления дифракции на круговой решетке, шаг которой уменьшается к периферии линзы. При $N \gg 1$ дифракционная структура практически переходит в рефракционную, т. е. класс ДОЭ по сути включает в себя рефракционные элементы.

Важной особенностью дифракционной линзы является ее очень малая толщина.

Дифракционные элементы можно использовать также при создании так называемых гибридных линз, сочетая их с рефракционными элементами. Так как знаки дисперсии света в дифракционных и рефракционных элементах противоположны, то благодаря такой оптической гибридизации можно построить оптический элемент, практически не имеющий хроматизма, т. е. способный работать в белом свете. Эти свойства используются при создании проигрывателей DVD-дисков, приборов ночного видения и даже искусственного хрусталика глаза.

Сибирский лазерный станок

Исследования в области дифракционной оптики были начаты в Институте автоматизации и электротехники (ИАиЭ) СО АН СССР в начале 1970-х. На первом этапе ученые пытались изготовить линзу — базовый дифракционный элемент — путем фотографирования интерференционной картины с круговой симметрией, создаваемой специальным интерферометром Фабри-Перо. Линзу удавалось получить за одну экспозицию, однако для каждого нового элемента нужно было создавать новый интерферометр...

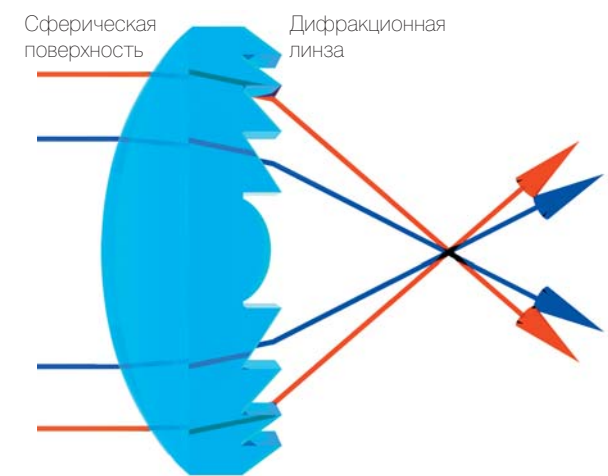
Толчком к созданию универсального метода изготовления ДОЭ послужили работы американского профессора А. Корпеля. В 1975 г. на первом советско-американском семинаре по оптической обработке информации он про-

Важное отличие дифракционной линзы от классической — очень малая толщина: при одинаковой оптической силе она может быть в тысячи раз тоньше

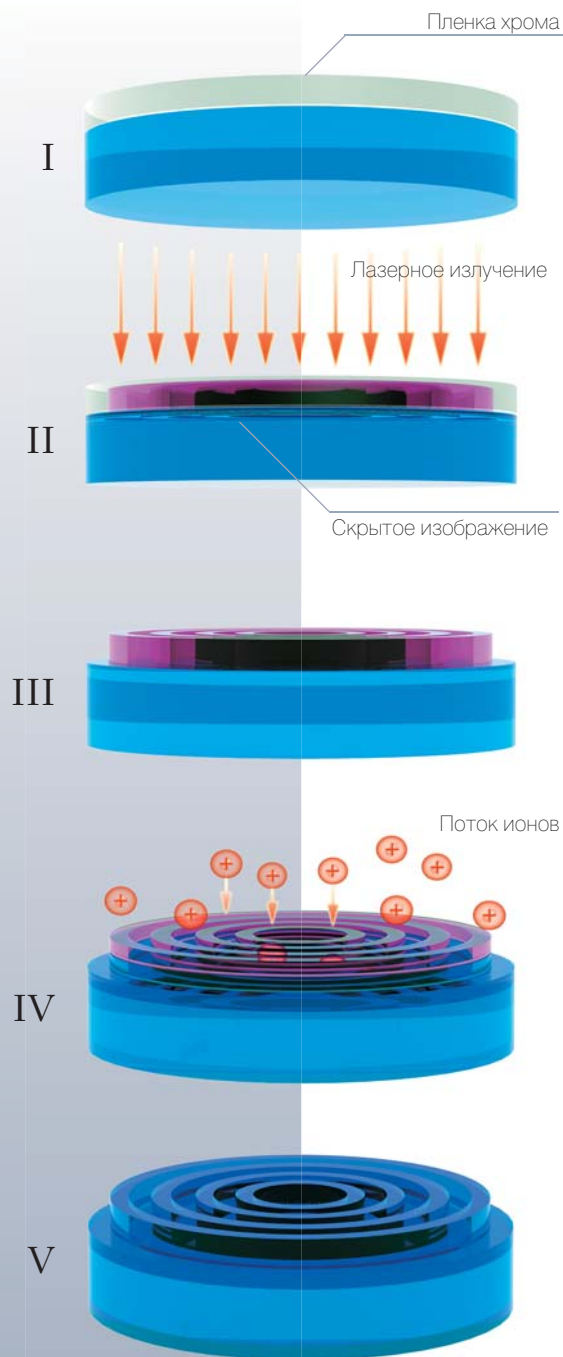
демонстрировал приставку к телевизору, показывающую цветной фильм с видеопластинки диаметром 30 см. Корпель считал, что будущее — за технологией прямой лазерной записи на вращающемся диске.

После семинара В. П. Коронкевич предложил создать в ИАиЭ лазерную записывающую систему (ЛЗС), которая могла бы записывать цифровую информацию на диск — «Видеодиск». Однако вскоре стало ясно, что соревноваться с крупными фирмами-производителями видеодисков неперспективно, и было решено использовать созданную систему для записи дифракционной оптики.

Поскольку большинство оптических систем обладает вращательной симметрией относительно оптической оси, разработанное устройство предназначалось для записи ДОЭ в полярной системе координат, что позволило значительно увеличить скорость записи. Конструкция первой ЛЗС напоминала токарный станок, где



Гибридная дифракционно-рефракционная линза



На поверхность стеклянной пластины наносится тонкая (50—80 нм) пленка хрома

Запись проводится сфокусированным пучком мощного лазера, управляемым компьютером. Пленки хрома меняют свою структуру, на их поверхности образуется слой окислов—образуется скрытое изображение

Скрытое изображение проявляют в селективном проявителе: чистый хром растворяется, экспонированные участки остаются

Для получения рельефа проводят травление фтором, ионы которого быстро разрушают стекло, почти не трогая хром

После получения рельефа нужной глубины остатки хрома стравливаются и дифракционный элемент готов

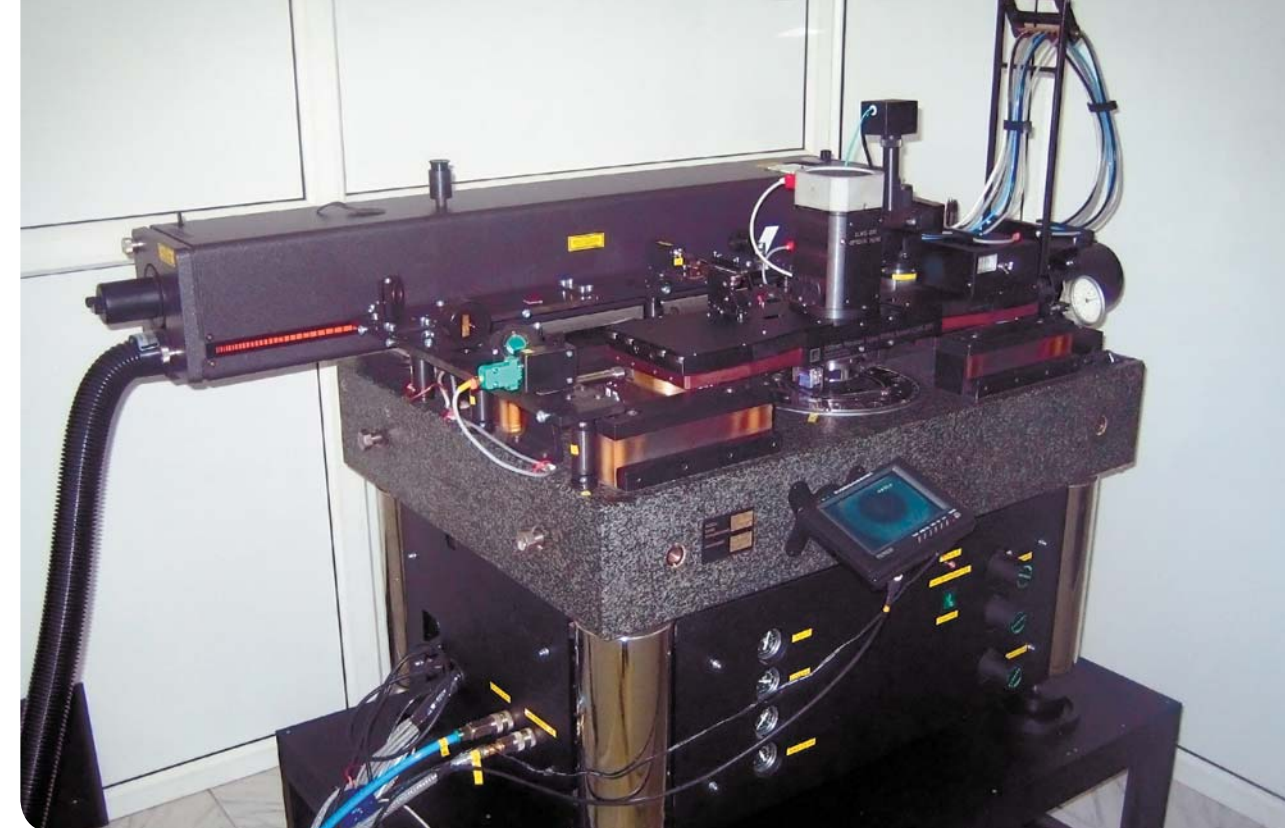
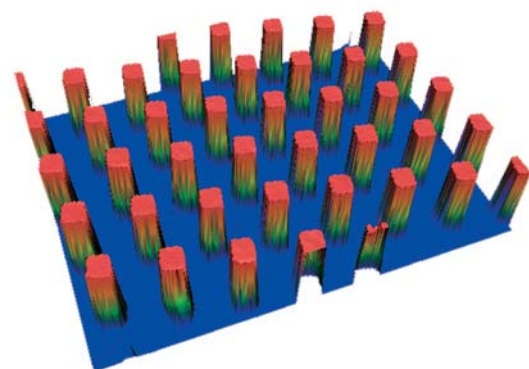
роль резца выполнял сфокусированный пучок аргонового лазера. В 1980-х годах на этой системе были изготовлены дифракционные элементы диаметром до 20 см и минимальными размерами структуры до 1 мкм.

Известно, что лазерное излучение можно сфокусировать в пятно с размером меньше длины волны света, получив в нем гигантскую плотность мощности: расположенное в фокусе вещество может быть практически мгновенно нагрето до температуры в несколько тысяч градусов. При таких быстрых перепадах температур характеристики многих веществ меняются. Поэтому, управляя перемещением лазерного пятна и мощностью лазерного излучения, поверхности можно придать требуемые свойства и форму.

В качестве светочувствительных материалов в ИАиЭ сначала использовались тонкие пленки халькогенидных стекол — стеклообразных полупроводников, содержащих химические элементы VI группы периодической таблицы (сера, селен и т.д.).

Затем стали исследовать возможности записи ДОЭ путем испарения пленок хрома, и уже в первых экспе-

Лазерная термохимическая технология изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным профилем, разработанная в лаборатории лазерных технологий ИАиЭ СО РАН



риментах был случайно обнаружен термохимический эффект образования в них скрытого изображения. (Позже стало известно, что подобная технология ранее была открыта ленинградской группой исследователей.) Достоинство этой технологии в том, что хром можно очень равномерно нанести на поверхности практически любых размеров, и дифракционная структура формируется точно в тех местах, где воздействовало лазерное излучение.

Таким путем удалось получить рельеф с минимальными размерами в доли микрона. Этот метод записи высококачественных дифракционных амплитудных элементов, штриховых и угловых шкал, кодовых дисков, сеток и различного рода фотошаблонов сразу привлек к себе внимание оптической промышленности — до этого все работы велись исключительно на инициативной основе.

В 1980—90-е гг. методы лазерной записи постоянно совершенствовались. Совместно с НПО «ЛУЧ» (г. Подольск) были изготовлены первые в России мастер-диски для магнитооптической памяти. Созданная в ИАиЭ ЛЗС второго поколения стала прототипом коммерческой версии (CLWS-300С), разработанной совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН. Эта система была закуплена научными и производственными центрами не только России, но и Германии, Италии, Китая.

В дальнейшем были освоены новые материалы для оптической записи — фоторезисты, аморфный кремний, LDW-стекла и др., что позволило создать новые классы дифракционных элементов.

Недавно в ИАиЭ была разработана ЛЗС нового поколения CLWS-200, меньшая по размерам, но по техническим характеристикам превосходящая все предыдущие системы

Применение ДОЭ: дела небесные...

Применение дифракционных элементов в ряде случаев открывает совершенно новые уникальные возможности в самых разных областях — от медицины до космических исследований.

Яркий пример — телескопы, до сих пор остающиеся самыми мощными инструментами познания Вселенной. Первый в мире телескоп, созданный Галилеем в 1609 г., имел диаметр зрачка 5 см. За четыре столетия размер зеркал телескопов достиг 10 м, а в планах ученых — создание гигантов с размером зеркал до 100 м! Такие телескопы позволят разглядеть на Луне предмет размером с мяч и различить планеты земного типа у ближайших звезд.

Однако мало просто изготовить гигантское зеркало, его нужно тщательно проверить, иначе огромный труд и средства будут потеряны. 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 должна быть менее 1 мм. Поэтому необходим эталон, с которым бы оптики пос-

Методы записи, разработанные в ИАиЭ СО РАН, позволили изготовить уникальные дифракционные оптические элементы для контроля 6,5- и 8,4-метрового зеркал телескопа Магеллан и Большого бинокулярного телескопа? разработанных в Стюардской обсерватории университета Аризоны (г. Туссон, США). Оба телескопа уже дали «первый свет»

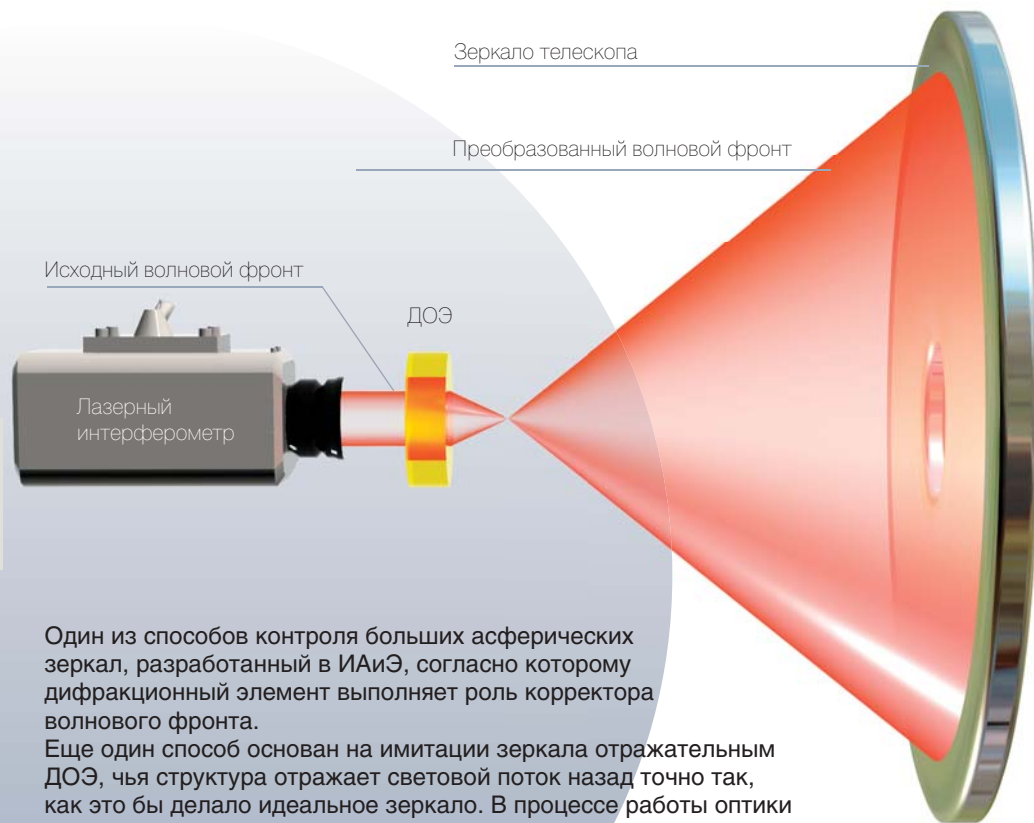
тоянно сравнивали результаты своего труда. Оказалось, что для этой цели идеально подходят дифракционные оптические элементы.

Метод контроля астрономических зеркал с применением ДОЭ был разработан относительно недавно и сейчас применяется при создании всех больших зеркал. Толчком к этому послужила история с космическим телескопом Хаббл, когда 2,4-метровое зеркало

было отполировано без контроля с использованием ДОЭ. В результате форма поверхности зеркала стала отличаться от заданной всего на 0,5 микрона, но это в 10 раз ухудшило разрешающую способность телескопа! Понадобилась специальная экспедиция на корабле Шаттл для его коррекции.

Особенностью ДОЭ для контроля больших астрономических зеркал являются их относительно большие размеры — до 250 мм при минимальных размерах дифракционной структуры около 0,5 мкм, причем зоны на поверхности такого ДОЭ должны быть нанесены с погрешностью не более 50 нм.

Однако дифракционные элементы могут быть не только помощниками при создании зеркал телескопов, но и их прямыми конкурентами! Недавно ученые Ливерморской лаборатории (США) предложили оригинальный проект, в котором в качестве объектива космического телескопа используется длиннофокусная дифракционная линза, нанесенная на тонкую пленку. Такая линза, в отличие от зеркала, значительно менее чувствительна к неровностям поверхности, что существенно при больших размерах. При диаметре



Зеркало телескопа

Преобразованный волновой фронт

Исходный волновой фронт

ДОЭ

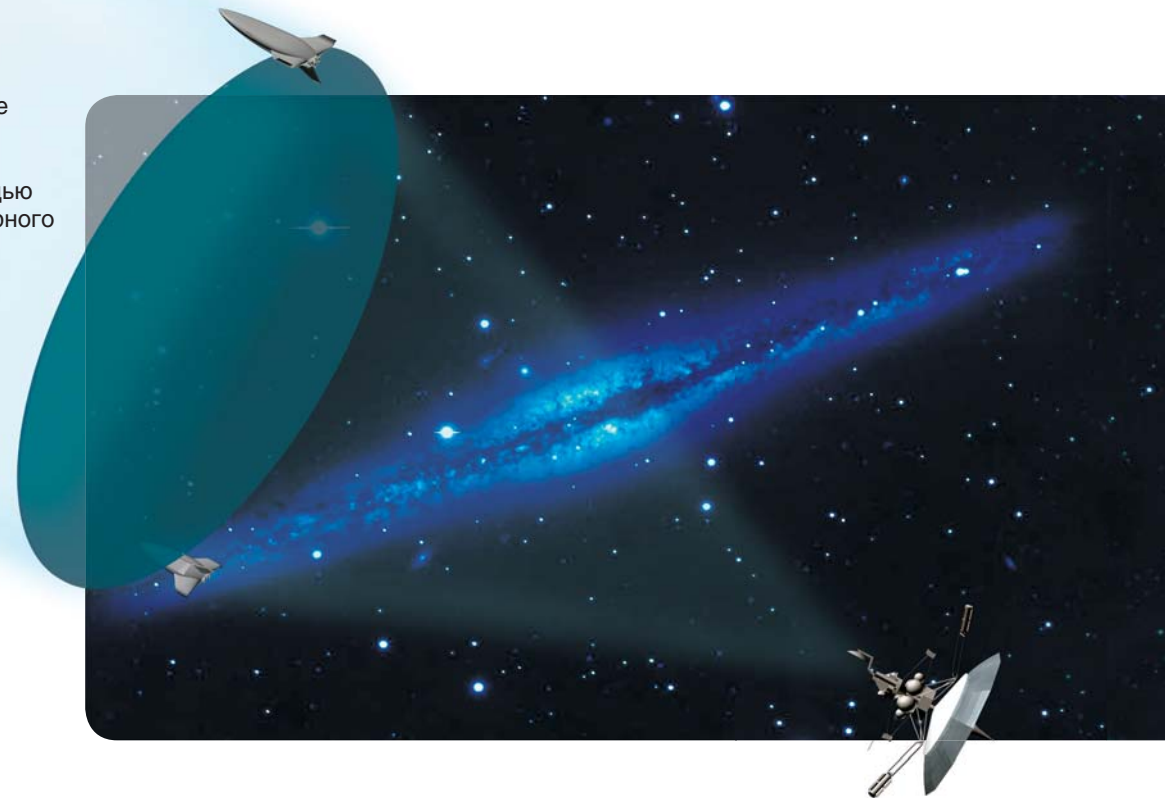
Лазерный интерферометр

ДОЭ преобразует форму исходного волнового фронта лазерного интерферометра в асферический волновой фронт, точно соответствующий форме поверхности зеркала. Интерферометр измеряет разность между этим фронтом и поверхностью зеркала в долях длины волны света

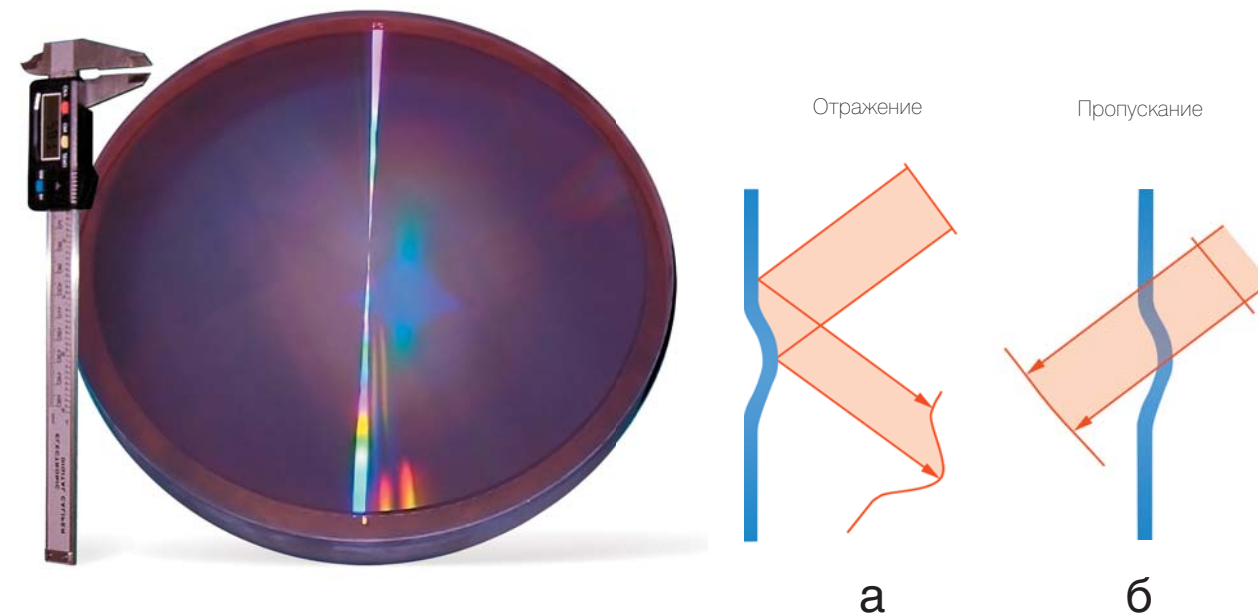
Один из способов контроля больших асферических зеркал, разработанный в ИАиЭ, согласно которому дифракционный элемент выполняет роль корректора волнового фронта.

Еще один способ основан на имитации зеркала отражательным ДОЭ, чья структура отражает световой поток назад точно так, как это бы делало идеальное зеркало. В процессе работы оптики могут сравнивать форму полируемого зеркала с эталоном, которым служит имитатор

Первое изображение (галактика NGC891, 12 октября 2005 г.), полученное с помощью Большого бинокулярного телескопа



Дифракционный элемент диаметром 21 см, созданный для контроля зеркала Большого бинокулярного телескопа диаметром 8,4 м



Отражение

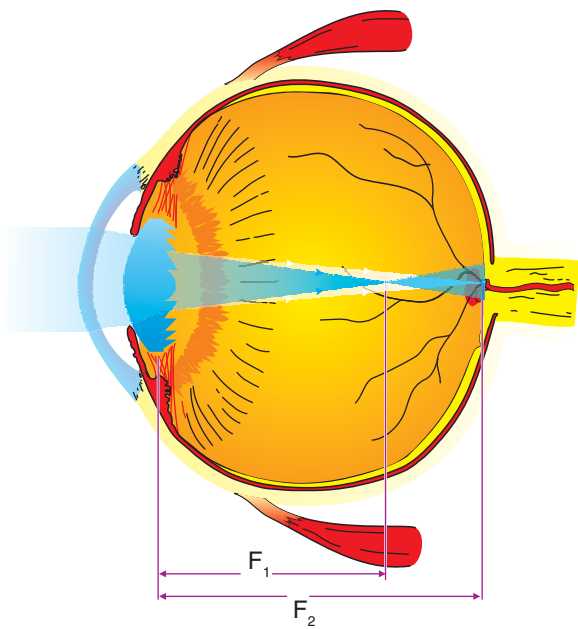
Пропускание

а

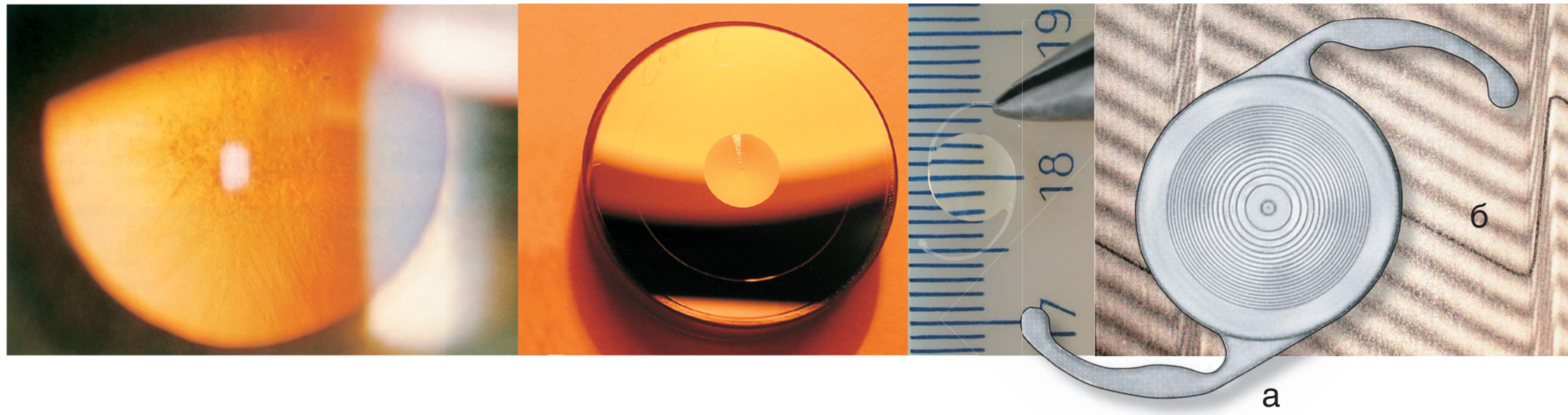
б

Длиннофокусная дифракционная линза, нанесенная на тонкую пленку, может использоваться в качестве объектива космического телескопа. Обычное зеркало отражает свет, поэтому все неровности поверхности будут с удвоенной амплитудой искажать волновой фронт (а). Свет же, проходящий сквозь изогнутую тонкую подложку дифракционного элемента, искажается значительно слабее (в 10 тыс. раз при толщине подложки в 0,1 мм) (б).

Согласно проекту американских ученых, дифракционный телескоп будет состоять из космических кораблей, несущих 25-метровую линзу и 1-метровый окуляр (см. рисунок вверху). Дистанция между кораблями будет примерно равна фокусному расстоянию линзы (1 км). Окуляр будет собирать свет, поступающий от дифракционной линзы, и осуществлять цветовую коррекцию



Глаз человека с имплантированным искусственным хрусталиком.
 F_1 и F_2 — фокусы для ближнего и дальнего зрения



Глаз человека, пораженный катарактой

Слева внизу — этапы операции по имплантации искусственного хрусталика в Новосибирском филиале МНТК «Микрохирургия глаза»

Справа — гибридная интраокулярная линза «Аккорд» (а), разработанная в ИАиЭ СО РАН, изготовленная в НПП «Репер» (г. Нижний Новгород) из эластичного полимера, и интерферограмма одной из ее дифракционных зон (б). Слева — матрица для изготовления линзы



25 м такая линза будет весить всего около 100 мг, в то время как в 10 раз меньшее зеркало телескопа Хаббл весит 800 кг.

Сейчас уже созданы прототипы дифракционных линз диаметром около 1 м и получены изображения Луны, планет, пятен на Солнце.

...и дела земные

Основные оптические характеристики хрусталика глаза здорового человека — прозрачность, способность к поглощению ультра-

фиолетовых лучей, а также к фокусировке как дальних, так и ближних объектов. Катаракта любого происхождения приводит к потере всех перечисленных функций, поэтому имплантация искусственного хрусталика (интраокулярной линзы, ИОЛ) после удаления пораженного является на сегодня самым эффективным средством в современной хирургии глаза.

Сегодня в мире ежегодно имплантируется несколько миллионов искусственных хрусталиков. Как

правило, используют обычные однофокусные рефракционные линзы, позволяющие восстановить две из трех основных функций естественной линзы глаза. Проблема аккомодации (т.е. ясного зрения на различных расстояниях) такими линзами не решается.

Создать условия псевдоаккомодации возможно благодаря применению гибридных (дифракционно-рефракционных) линз, одновременно формирующих изображения ближних и дальних пред-

метов. Клинические испытания показали, что мозг человека после некоторой тренировки способен выделить нужное изображение дальних или ближних объектов. Поэтому после имплантации гибридных ИОЛ можно отказаться от очков.

Разработанная в ИАиЭ гибридная интраокулярная линза состоит из традиционной рефракционной линзы, на одну из поверхностей которой нанесена специальная дифракционная микроструктура в виде круговой дифракционной решетки с пилообразным профилем. Гибридная ИОЛ формирует два фокуса одновременно всей поверхностью, при этом бифокальность не зависит от диаметра зрачка. Для уменьшения вероятности биологических отложений на перепадах глубины микрорельефа линзы были сформированы пологие скаты между дифракционными зонами.

Линзы «Аккорд» проходят в настоящее время первую стадию клинических испытаний в Новосибирском филиале МНТК «Микрохирургия глаза». Линза уже имплантирована нескольким десяткам пациентов. Послеоперационное исследование зрительных функций показало, что все пациенты хорошо видят дальние объекты и могут читать газету без очков. Ряду пациентов линзы «Аккорд» были имплантированы в оба глаза с целью устранения пресбиопии (старческой дальнозоркости). Это открывает большие возможности коррекции зрительных нарушений хирургическим путем, в том числе и у лиц пожилого возраста.

Подводя итог, хочется отметить, что дифракционные оптические элементы не являются конкурентами традиционных. Тем не менее сегодня очевидно, что будущее оптики неразрывно связано с разработкой и совершенствованием именно этих оптических элементов, обладающих поистине безграничными возможностями.

Оценить же уровень разработок сибирских оптиков проще всего, ознакомившись с отзывами коллег-ученых, посетивших ИАиЭ.

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