



# ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА

А. Г. Полещук, Институт автоматики и электрометрии  
СО РАН, г. Новосибирск

## Введение

Дифракционная оптика, как следует из самого названия, основана на принципах дифракции, в то время как в основе обычной оптики лежат законы отражения и преломления света.

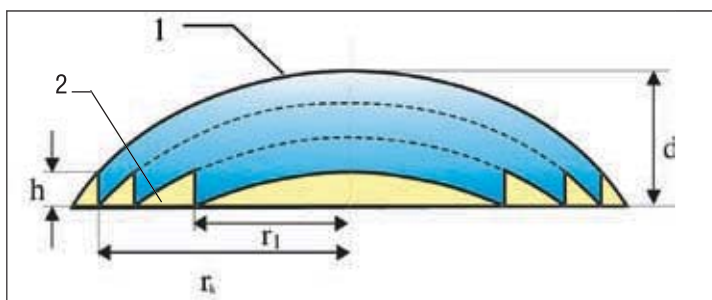
Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) не являются конкурентами традиционной оптики. В своё время революция в радиоэлектронике, вызванная созданием транзисторов, а затем микросхем, привела к появлению новых отраслей промышленности и в корне изменила нашу жизнь. Похожая ситуация складывается и в оптике. 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 микрона. Такие элементы могут заменять сложные объективы, преобразовывать по заданному закону лазерное излучение, формировать изображения объектов, рассчитанных компьютером. Использование плоских оптических элементов в оптике открывает перспективу создания дешёвых, лёгких, 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 дифракционных элементов сдерживаются отсутствием доступных методов изготовления поверхностного рельефа. Фирма Intel, вложив сотни миллионов долларов в развитие нанотехнологий, создала микропроцессоры с размерами проводников в несколько десятков нанометров. Структура поверхности ДОЭ имеет минимальные размеры около половины длины волны света (0.1-0.5 мкм), однако общие размеры могут достигать метров в диаметре, что во много раз больше размеров кристалла микросхемы. Кроме того, микрорельеф поверхности ДОЭ имеет очень сложную трёхмерную форму. Поэтому методы изготовления ДОЭ существенно отличаются от методов изготовления микросхем.

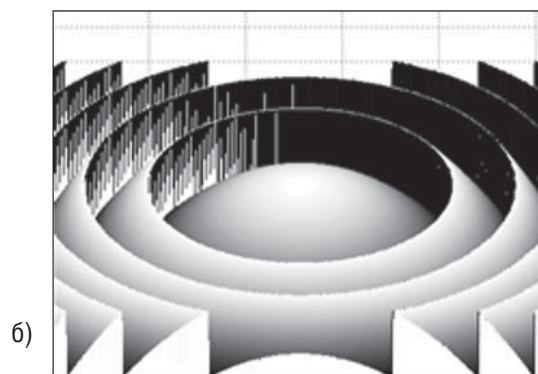
Дифракционная оптика – это обобщённый термин. Часто используются различные названия: компьютерная оптика, бинарная оптика, плоская оптика, голографическая оптика и т. д. В любом случае, речь идёт об оптических элементах, отличительной особенностью которых является использование явления дифракции света на микроструктурах с пространственной вариацией глубины и ширины.

## Дифракционные оптические элементы

Как устроена дифракционная линза и каковы её 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



а) Рис. 1. Преобразование плоско-выпуклой линзы в дифракционную линзу (а) и её трёхмерная модель (б).



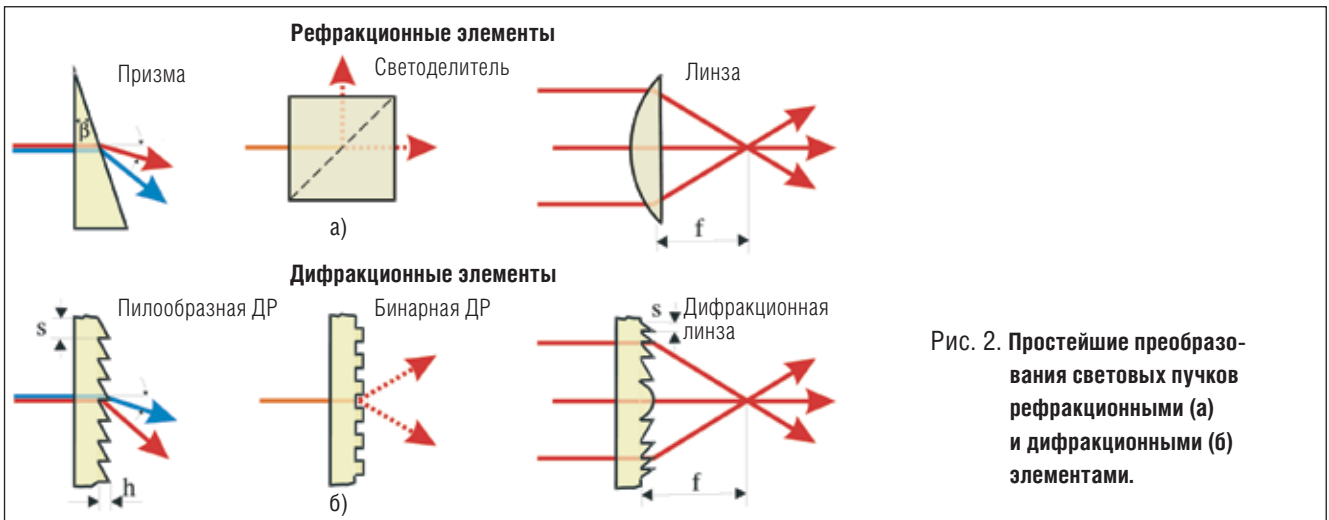


Рис. 2. Простейшие преобразования световых пучков рефракционными (а) и дифракционными (б) элементами.

изображений объектов, т. е. для геометрических и волновых преобразований световых пучков.

На рис. 1а представлена обычная плоско-выпуклая линза 1 и приведён геометрический способ построения на её основе дифракционной структуры 2. Для этой цели линза разделена на тонкие сферические слои одинаковой толщины (штриховые линии). Радиусы слоёв равны радиусу кривизны сферической поверхности линзы, а их толщина равна величине  $h = N\lambda/(n-1)$ , где  $\lambda$  – длина волны света,  $N$  – целое число,  $n$  – коэффициент преломления материала линзы. На рис. 1а, в качестве примера, 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 сферических слоёв толщиной 1 мкм будет равно 5000. Различные слои можно объединять в ступенчатую структуру 2 линиями, параллельными оптической оси. Полученная конфигурация 2 называется зонной пластинкой или дифракционной линзой. Очень важной и полезной особенностью дифракционной линзы является её очень малая толщина. В нашем примере она составляет всего 1 мкм. При одинаковой оптической силе толщина дифракционных линз 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 (рис. 2а) отклоняет световой пучок на угол  $\alpha_p = \beta(n-1)$ . Дифракционный аналог призмы – дифракционная решётка с пилообразной формой рельефа (решётка с «блеском») отклоняет свет на угол  $\alpha_d = \lambda/s$ , где  $s$  – период решётки, причём угол отклонения растёт с увеличением длины волны. Такая решётка 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 решётки будет иметь прямоугольную (бинарную) форму и глубину в два раза меньше, чем у пилообразной решётки, то световой пучок разделится на два равных пучка (рис. 2б).

Дифракционная линза не просто является аналогом обычной рефракционной линзы, а имеет существенное преимущество: она фокусирует световой пучок в пятно, определяемое только дифракцией на её апертуре. То есть тонкая дифракционная линза заменяет сложный многолинзовый объектив (рис. 3).

### Методы формирования микрорельефа дифракционных элементов

Большинство оптических систем обладает вращательной симметрией относительно оптической оси, поэтому в ИАиЭ СО РАН было разработано устройство, предназначенное для изготовления высококачественных ДОЭ в полярной системе координат. Подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью, в то время как сфокусированный записывающий пучок лазерного излучения перемещается вдоль прямой линии, пересекающей центр вращения (рис. 4а). Это позволяет значительно увеличить скорость записи. Известно, что лазерное излучение можно сфокусировать в пятно с размером меньше длины волны све-

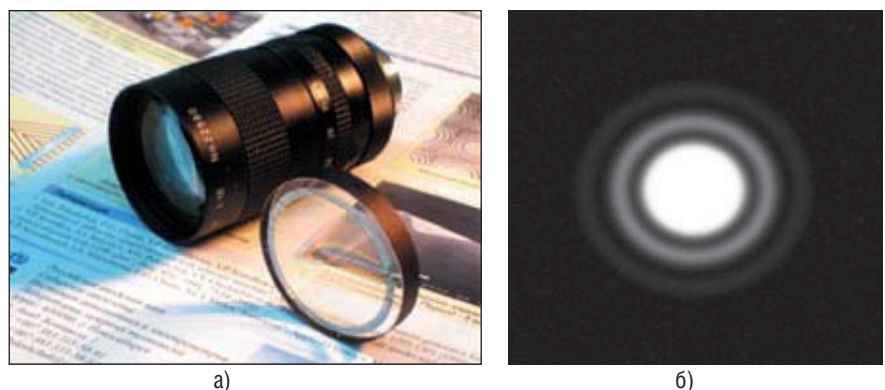


Рис. 3. Многолинзовый объектив и превосходящая его по качеству, изготовленная в ИАиЭ СО РАН дифракционная линза (а) и фотография лазерного пятна, сфокусированного дифракционной линзой с числовой апертурой  $NA=0.65$  (б)

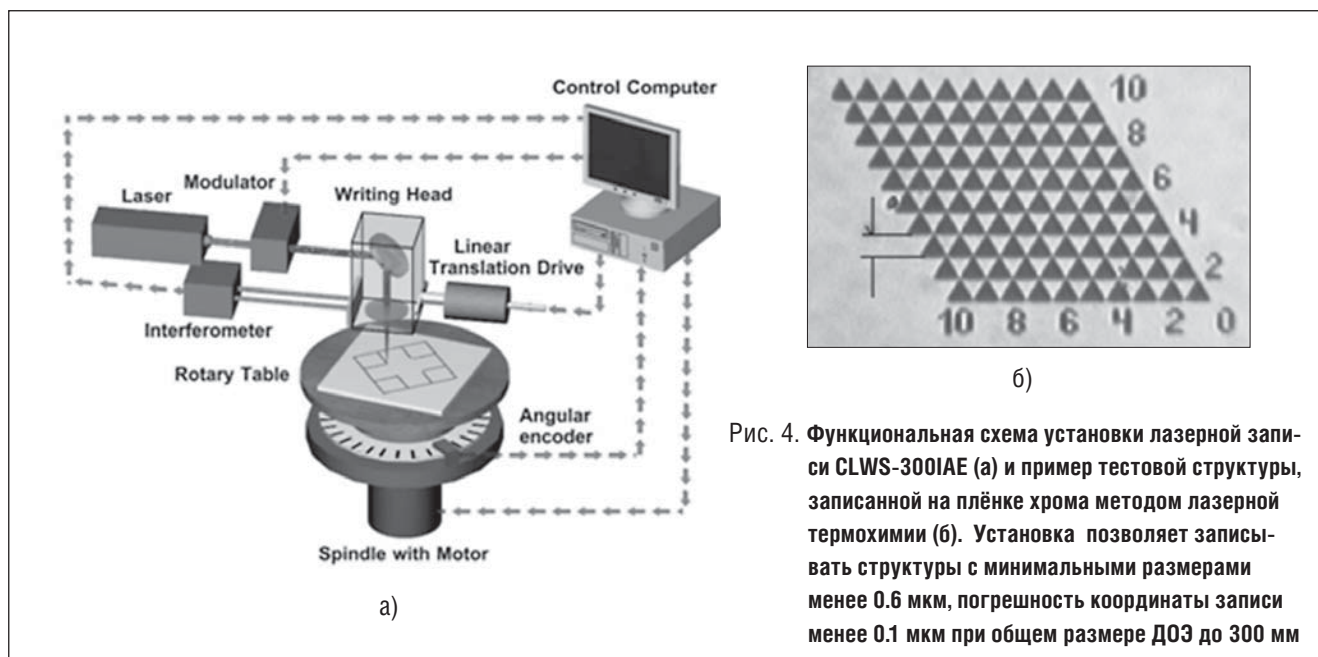


Рис. 4. Функциональная схема установки лазерной записи CLWS-300IAE (а) и пример тестовой структуры, записанной на плёнке хрома методом лазерной термохимии (б). Установка позволяет записывать структуры с минимальными размерами менее 0,6 мкм, погрешность координаты записи менее 0,1 мкм при общем размере ДОЭ до 300 мм

та (~ 0.5 микрона) и получить в нём высокую плотность мощности – тысячи мегаватт на квадратный сантиметр. Расположенное в фокусе вещество может быть практически мгновенно нагрето до температуры в несколько тысяч градусов. Управляя от компьютера перемещением лазерного пятна и мощностью лазерного излучения, можно придать поверхности некоторых материалов требуемые свойства. В качестве светочувствительного материала нами, в частности, используются плёнки хрома, в которых под действием нагрева, вызванного лазерным излучением, возникает скрытое «термохимическое» изображение. Это позволяет производить прямую запись высококачественных дифракционных амплитудных элементов, синтезированных голограмм, штриховых и угловых шкал, кодовых дисков, сеток и различного рода фотошаблонов.

В дифракционной оптике используются элементы, как с прямоугольным, так и с пилообразным профилем поверхности. На рис. 5 показаны разработанные в ИАиЭ СО РАН методы изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным (а) и пилообразным (б) профилем. Создание рельефа с прямоугольным профилем (рис. 5а) начинается с нанесения тонкой плёнки хрома, толщиной примерно 50-80 нм, на поверхность оптической пластины. Далее на этой пластинке проводится запись необходимой структуры сфокусированным пучком мощного лазера. Было установлено, что аморфные плёнки хрома после воздействия излучения меняют свою внутреннюю структуру, а на их поверхности образуется тонкий слой окислов хрома. Управляя от компьютера перемещением лазерного пятна и мощностью лазерного излучения, можно создать в плёнке хрома скрытое изображение, которое затем проявляется в селективном проявителе: чистый хром быстро растворяется, а экспонированные участки остаются. Таким образом, формируется микроструктура из хрома на поверхности пластины. Для полу-

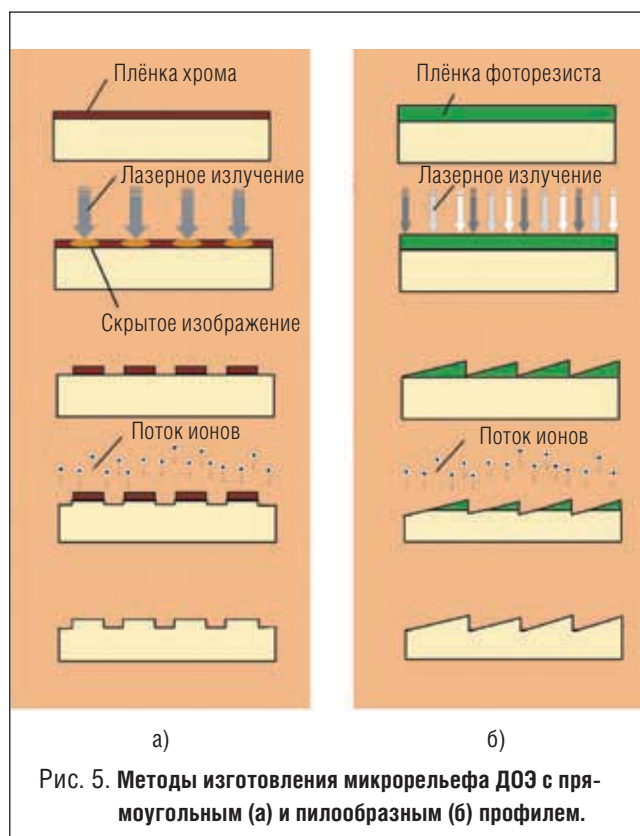


Рис. 5. Методы изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным (а) и пилообразным (б) профилем.

чения рельефа в стекле, проводится реактивное ионное травление. После получения рельефа нужной глубины, остатки хрома стравливаются, и дифракционный элемент с бинарным рельефом готов. Таким путём удастся получить дифракционные структуры с минимальными размерами в доли микрона.

Лазерная технология создания рельефа с пилообразной и любой другой формой поверхности представлена на рис. 5б. На первом этапе на пластину наносится тонкая плёнка 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 изменить толщину плёнки. Для формирования рельефа поверхность плёнки экспонируется движущимся сфокусированным лазерным пучком, причём мощность излучения меняется по заданному закону. После проявления в плёнке образуется рельеф с заданной формой. На последнем этапе проводится реактивное ионное травление, и рельеф из плёнки фоторезиста переносится в материал пластины. Примеры такого рельефа приведены на рис. 6.

**Практические применения дифракционной оптики**

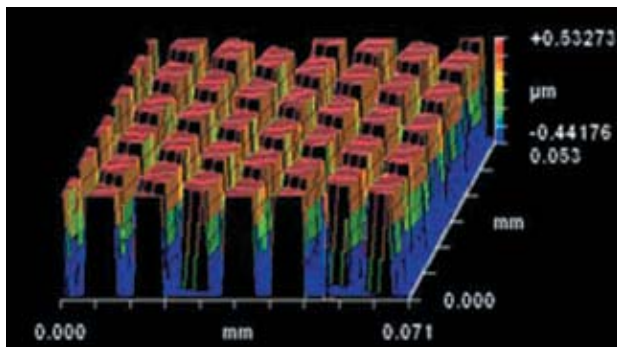
В настоящее время ДОЭ уже широко применяется на практике. В ряде случаев их применение открывает совершенно новые уникальные возможности.

Телескопы остаются в настоящее время самыми мощными инструментами познания вселенной. Создание Галилеем в 1609 году первого телескопа сразу принесло множество открытий. Первый телескоп имел диаметр 5 см. За 4 столетия размер зеркал телескопов достиг

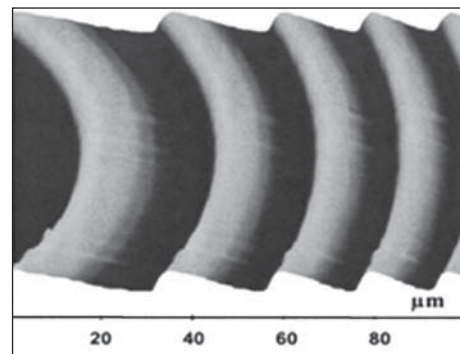
10 м, и уже есть проекты создания гигантских телескопов с размером зеркал в 25, 50 и 100 м. Такие телескопы, базируясь на земле (атмосферные турбулентности устраняются адаптивной оптикой), позволят разглядеть на Луне предмет размером в мяч и различить планеты земного типа у ближайших звёзд.

Однако оказалось, что изготовить гигантское многометровое зеркало мало, надо его тщательно проверить. Иначе огромный труд будет потерян (такие зеркала изготавливаются по несколько лет и стоят миллионы долларов). Асферическая поверхность зеркала телескопа должна быть выполнена с точностью в десятки нанометров. Для обработки поверхности зеркала нужен эталон, с которым оптики постоянно бы сравнивали результаты своего труда. Оказалось, что ДОЭ, обладающие свойством преобразовывать форму волнового фронта, идеально подходят для этой цели.

В ИАиЭ СО РАН разработаны и реализованы на практике два основных варианта контроля асферических зеркал. Согласно первому варианту (рис. 7а), ДОЭ непосредственно преобразует форму исходного волнового фронта лазерного интерферометра в асферический волновой

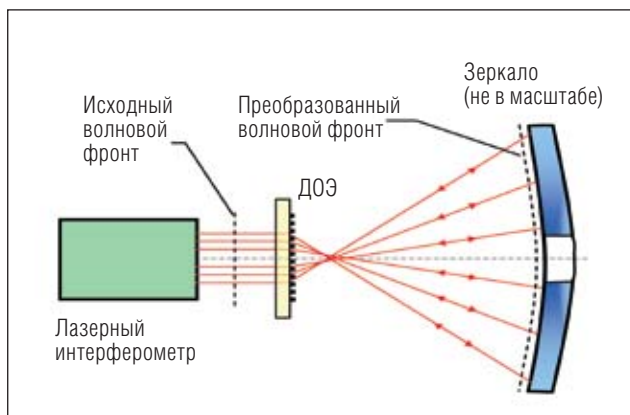


а)

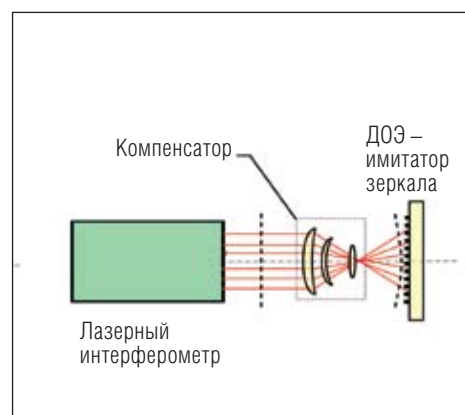


б)

Рис. 6. Примеры поверхностей дифракционных элементов с бинарным (а) и пилообразным (б) профилем, изготовленные методами прямой лазерной записи в ИАиЭ СО РАН.



а)



б)

Рис. 7. Оптические системы для измерения формы поверхности зеркал: ДОЭ выполняет роль корректора (а) и ДОЭ выполняет роль имитатора зеркала (б).

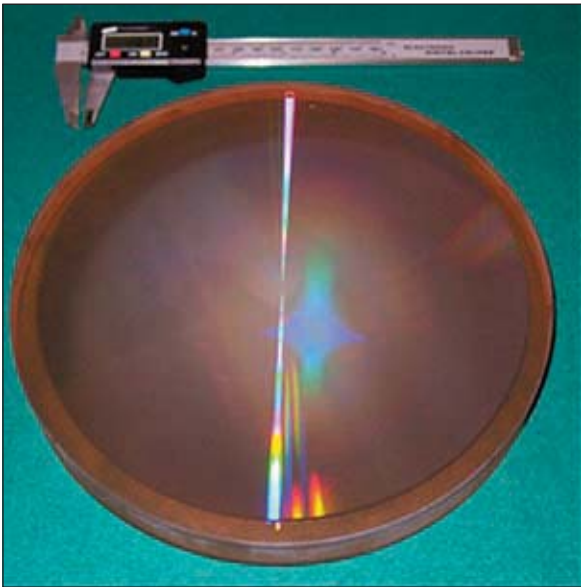


Рис. 8. Внешний вид ДОЭ для проверки 8.4-м зеркала БТ



а)



б)

Рис. 9. Большой бинокулярный телескоп (2 зеркала  $f/1.14$  диаметром 8.4 м) перед вводом в эксплуатацию (а) и изображение галактики NGC891, полученное этим телескопом (б)

фронт, который точно соответствует форме поверхности контролируемого зеркала. Оптический прибор – интерферометр, измеряет разность между этим фронтом и поверхностью зеркала в долях длины волны света.

Согласно второму варианту (рис. 7б), преобразование волнового фронта производилось многолинзовой системой (корректором), а вместо большого контролируемого зеркала, для калибровки, ставится его имитатор – отражательный ДОЭ относительно небольшого размера. Дифракционная структура этого элемента отражает световой поток назад точно так, как это бы делало идеальное зеркало. В процессе работы оптики поочередно могут сравнивать форму полируемого зеркала с эталоном, которым 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 зеркало диаметром 2.4 м было отполировано без применения дифракционного имитатора, в результате чего форма его поверхности стала всего на 0.5 микрона отличаться от заданной. Но это в 10 раз ухудшило разрешающую способность телескопа. Понадобилась специальная экспедиция в космос на корабле Шаттл для ремонта телескопа.

Особенностью ДОЭ для контроля астрономических зеркал, является их большие размеры – до 250 мм при минимальных размерах дифракционной структуры около 0.5 мкм. Причём все зоны на поверхности такого ДОЭ должны быть нанесены с погрешностью менее 50 нм (рис. 8). Предложенный метод лазерной записи в полярной системе координат позволил создать ДОЭ для контроля любых зеркал, как существующих, так и проектируемых. В ИАиЭ СО РАН изготовлены ДОЭ для контроля 6.5- и 8.4-метровых зеркал телескопов Магеллан и Большой бинокулярный телескоп (ББТ), созданных в Стюардской обсерватории университета Аризоны, г. Туссон, Аризона, США. ДОЭ позволили выявить и устранить ошибки при полировке этих зеркал. Оба телескопа уже приняты астрономами в эксплуатацию и дали первый свет (рис. 9).

### Заключение

Создание установки лазерной записи CLWS-300IAE стимулировало исследовательские работы, направленные на разработку новых технологий синтеза дифракционных структур. Изготовление элементов в полярной системе координат оказалось продуктивным. Точность воспроизведения формы волнового фронта дифракционными элементами достигла  $\lambda/20 - \lambda/50$ , что соответствует наивысшим стандартам классической оптики.

Значительным стимулятором работ стала разработка термохимической технологии изготовления компонентов дифракционной оптики в тонких плёнках хрома. Разработанная технология отличается исключительной простотой и воспроизводимостью, в сочетании с высоким качеством получаемых микроизображений. ■