

# ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

А.Полешук, А.Маточкин, matochkin@iae.nsk.su,  
Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Компьютерные технологии трехмерной обработки материалов позволяют создавать оптические компоненты с поверхностями произвольной формы. Однако классические методы не обеспечивают контроль формы асферических поверхностей с требуемой точностью. В статье рассмотрены физические основы методов бесконтактного контроля формы асферических поверхностей с нанометрической точностью на основе применения компьютерно-синтезированных голограмм и лазерных интерферометров. Приведены практические результаты контроля уникальных асферических зеркал телескопов.

Современные оптические системы уже невозможно представить без асферических линз. В фотообъективе современной цифровой камеры можно найти, по крайней мере, две асферики. Одна асферическая линза заменяет собой 2–3 обычные сферические линзы. В CD- и DVD-проигрывателях, мобильных телефонах используются исключительно асферические линзы. В других высокотехнологичных приложениях – приборах ночного видения, проекционной микрофотографии, космических системах мониторинга – везде необходима оптика с большим числом асферических поверхностей. Применение асферики обеспечивает существенное уменьшение массы и габаритов оптических приборов, улучшение качества изображения, светосилы и угла поля зрения [1]. Потребители асферической оптики предъявляют высочайшие требования к точности ее изготовления. Стекланные оптические поверхности изделий широкого применения изготавливают с точностью обработки порядка 50–100 нм, в то время как оптика телескопов должна быть выполнена с точностью до 5–10 нм и выше. В таких прикладных разработках, как литографические объективы для области экстремально-ультрафиолета и рентгена, оптики, допустимое отклонение

от формы поверхности должно быть не более 0,1–1 нм при размере поверхности до 0,5–1 м. Качество асферики определяется, с одной стороны, точностью процесса изготовления, а с другой – точностью систем контроля формы этой поверхности. В производстве такой оптики актуален тезис: “если нельзя измерить, то невозможно создать”. В настоящей работе представлены результаты разработки методов и средств бесконтактного контроля формы асферических и нетипичных оптических поверхностей большого размера с нанометрической точностью на основе применения компьютерно-синтезированных голограмм (СГ) в сочетании с лазерными интерферометрами.

## АСФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Асферическая поверхность – это отражающая или преломляющая поверхность, изготовленная с отклонением от сферы (рис.1). Радиальное сечение асферической поверхности описывается уравнением:

$$Z(r) = \frac{r^2}{R \left( 1 + \sqrt{1 - (1+K) \left( \frac{r}{R} \right)^2} \right)} + \sum_{n=2}^m A_{2n} r^{2n},$$

где  $r$  – радиальная координата,  $R$  – радиус в вершине поверхности,  $K$  – коническая константа,  $A_{2n}$  –

коэффициент полинома, обеспечивающего задания асферических элементов высших порядков. Различные типы асферики задаются следующими значениями константы  $K$ : при  $K > 0$  образуется сплюснутый эллипс,  $-1 < K < 0$  соответствует вытянутому эллипсу,  $K = 0$  – сфера,  $K = -1$  – парабола,  $K < -1$  – гипербола. Во многих приложениях используются внеосевые сегменты асферической поверхности. Для компенсации несимметричных волновых аберраций применяют асферические поверхности так называемой “свободной формы” (free-form surfaces), такие поверхности описываются двумерными полиномами.

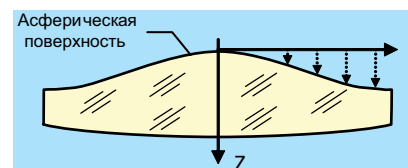


Рис.1. Сечение асферической линзы

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В настоящее время известно достаточно много методов контроля асферических поверхностей (табл.1). Контроль асферики с наибольшей точностью, высокой воспроизводимостью и простотой обеспечивают компенсационные методы на основе применения СГ. Такие голограммы

Таблица 1. Методы контроля асферических поверхностей

Методы измерения		Точность, нм	Достоинства	Недостатки
Сканирующие методы	Профилограф [10]	0,5–2	Универсальность	Заданная траектория, большое время измерения, контакт
	Пентапризма [10]	20–50	Универсальность	Заданная траектория, большое время измерения
Экранные методы	Датчик Шека - Гартмана [10]	20–50	Простота, большой диапазон	Ограниченное пространственное разрешение и точность
Интерференционные методы	Интерферометр сдвига (боковой, радиальный, угловой и т.п.) [10]	10–100	Простота, большой диапазон	Ограниченная точность и чувствительность, трудность расшифровки
	Точечный дифракционный интерферометр [10]	10–30	Простота, точность, отсутствие эталона	Нестандартное оборудование, ограниченный диапазон.
	Синтезированная длина волны (двухволновый) [10]	10–100	Большой диапазон, грубая поверхность	Нестандартное оборудование, ограниченная точность
	Интерферометр со сшивкой апертур	10–30	Универсальность	Ограниченная точность, большое время измерений, сложное программное обеспечение
	Интерферометр со сканированием вдоль оси (VeriFire Aspere) [10]	60–200	Универсальность	Контроль осевых линз, большие время измерения и стоимость, ограниченная точность
	Прямой метод измерения [10]	60–300	Простота, обычный интерферометр	Отступление от сферы < 1000 $\lambda$ , дополнительные погрешности
	Компенсационный с линзовым корректором	До 1–5	Высокая точность	Сложность сборки и юстировки линзового корректора
	Компенсационный с СГ-корректором [11, 16]	До 1–5	Простая юстировка, высокая точность	Требуется изготовление СГ, возможны оптические шумы
Компенсационный с пространственным модулятором [10]	20–50	Универсальность	Отступление от сферы < 100 $\lambda$ , ограниченная точность, сложность сертификации	

в отечественной литературе получили название "голограмма-корректор, компенсатор, а в зарубежной – diffractive null lens или null CGH. Голограмма-корректор преобразует исходный волновой фронт  $W_1$  обычно интерферометра (плоского или сферического) в волновой

фронт  $W_2$ , сопряженный с формой асферической поверхности (рис.2).

Если форма поверхности асферики точно соответствует расчетной, то при отражении от нее и вторичном проходе через СГ волновой фронт совпадает с исходным фронтом. Ин-

терферометр регистрирует интерферограмму (рис.2б) в виде прямых полос. Малейшее отклонение в форме поверхности от заданной приведет к изменению формы волнового фронта и искривлению полос. Чувствительность этого метода определяется выражением:  $E=(dN/$

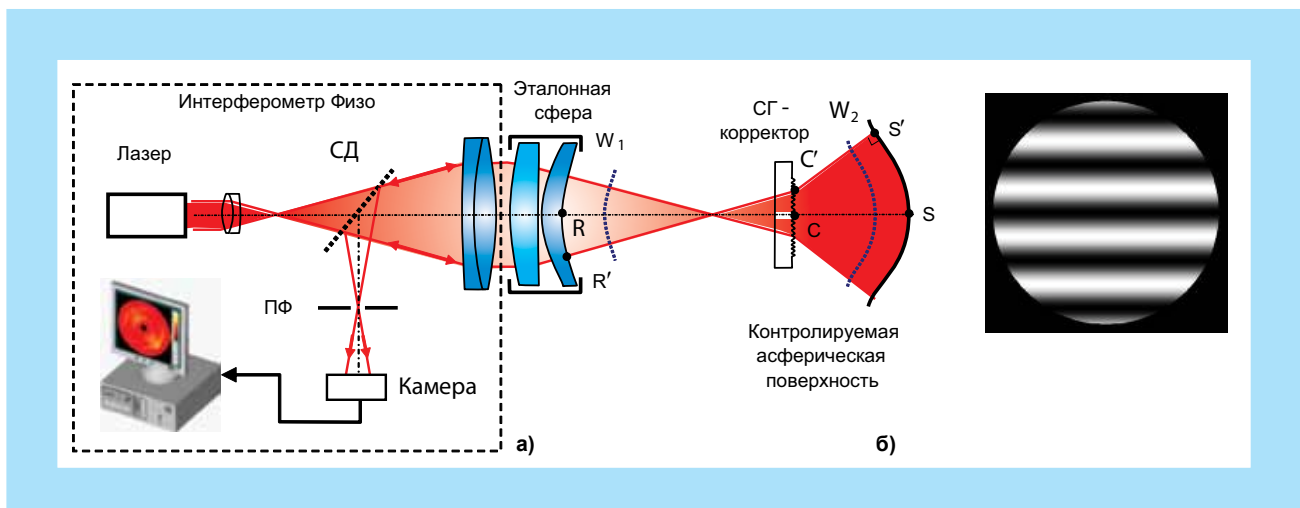


Рис.2. Контроль асферической поверхности: а) оптическая схема лазерного интерферометра Физо и СГ; б) форма регистрируемых интерференционных полос при точно изготовленной асферике

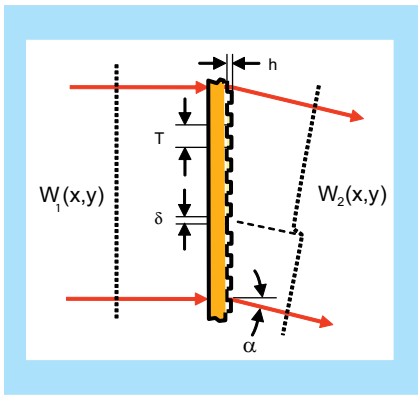


Рис.3. Модель СГ как дифракционной решетки

$T)(\lambda/2)$ , где  $E$  – минимально регистрируемое отклонение формы поверхности,  $dN$  – регистрируемое смещение полосы при отношении сигнал-шум  $\geq 1$ ,  $T$  – период полос,  $\lambda$  – длина волны (обычно  $\lambda=633$  нм). Если интерферометром регистрируется смещение в  $0,001$  полосы, то чувствительность составит  $E \sim 0,3$  нм. Таким образом, реализуется принцип “оптического компаратора”, позволяющий регистрировать и измерять малейшие отклонения формы поверхности от заданной. Точность оптического компаратора определяется в основном следующими факторами: точностью расчета и изготовления СГ; особенностью дифракционной структуры СГ, точностью юстировки оптической измерительной системы и точностью интерферометра. Фазовая функция СГ определяется из геометрической модели хода лучей с нормальным падением на контролируемую поверхность. Фазовая функция СГ – это оптическая разность хода лучей  $R'C'S'$  и  $RCS$  (см. рис.2). СГ может быть как внеосевой, так и осесимметричной. Внеосевую СГ наклоняют на угол  $\alpha$  к оптической оси.

**КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММЫ**  
СГ – это дифракционный элемент, рассчитанный и синтезированный с помощью компьютерных средств, позволяющий производить практически любое преобразование формы

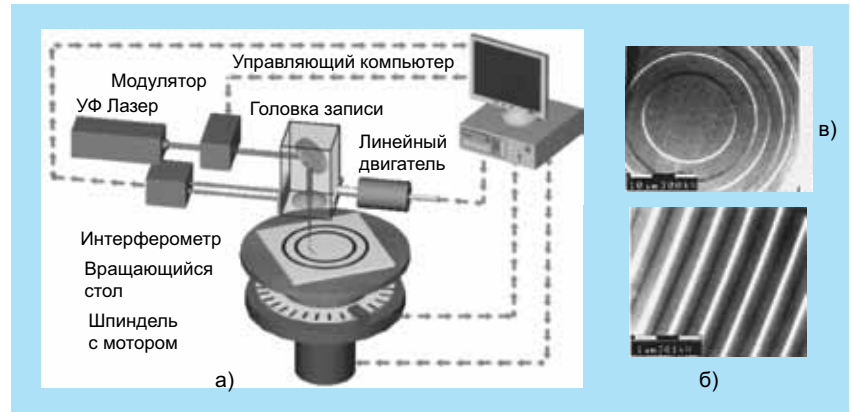


Рис.4. Изготовление синтезированных голограмм: схема установки CLWS-300IAE(а); микрофотографии структуры СГ диаметром 210 мм, записанной на пленке хрома методом лазерной термохимии: в центре(б), на краю(в)

волнового фронта. Это делает СГ исключительно полезной для задач контроля асферики и лазерной оптики. СГ обычно имеет вид картины искривленных полос (или зон) нанесенных или вытравленных в материале оптической подложки. Такая картина действует на небольшом участке как дифракционная решетка (рис.3), используя изменение периода  $T$  для управления углом отклонения дифрагированного света  $\sin\alpha = m\lambda/T$ , где  $m$  – порядок дифракции. Для задач контроля обычно применяются бинарные СГ с глубиной микрорельефа  $h = \lambda/2(n-1)$ , где  $n$  – коэффициент преломления подложки. Погрешности в нанесении картины полос, глубины рельефа и плоскостности подложки вносят ошибки  $\Delta W(x,y)$  в формируемый волновой фронт и, соответственно, влияют на точность контроля.

Локальная ошибка положения зоны СГ  $\delta$  приводит к появлению погрешности волно-

вого фронта  $\Delta W_\delta = -m\lambda(\delta/T)$  [2]. Если СГ бинарная, фазовая, то из-за неоднородности глубины  $\Delta h$  травления возникает погрешность волнового фронта:  $\Delta W_h \sim 0,25\Delta h$ . Для наиболее точных измерений нужно стремиться использовать СГ с амплитудным пропусканием (“хром на стекле”). Подложка СГ является одним из основных источников погрешностей, так как ошибки волнового фронта из-за оптических неоднородностей подложки и дифракционной структуры СГ складываются. Этот вклад заметен, когда размеры СГ велики.

Особенность применения СГ – это существование множества дифракционных порядков (ДП), которые распространяются как на отражение, так и на проход. ДП всегда перекрываются в осевых СГ, и это часто приводит к появлению яркого пятна в центре интерферограммы. Зато схема с внеосевой СГ и изломом опти-

Таблица 2. Составляющие погрешности контроля асферических поверхностей с помощью СГ

Источники ошибок	Допуски на изготовление	Искажения волнового фронта
Подложка (двойной проход)	$\lambda/20$	$\lambda/20$
Погрешности структуры СГ	$\pm 0,05$ мкм	$\pm \lambda/80$
Погрешности глубины травления	$\pm 5\%$	$\pm \lambda/80$
Погрешности юстировки	$\pm 1$ мкм	$\pm \lambda/40$
<b>Среднеквадратичная сумма (RSS)</b>	<b><math>\pm 0,04\lambda</math> (25 нм)</b>	

ческой оси [3], лишена подобного недостатка. Однако точность изготовления структуры внеосевой СГ меньше, чем осевой. Увеличение дифракционной эффективности позволяет существенно уменьшить влияние паразитных ДП. Расчет структуры СГ необходимо проводить таким образом, чтобы паразитные ДП не попадали в интерферометр.

Корректоры на основе СГ более чувствительны к юстировке, чем классические оптические элементы. Анализ показал, что для получения высокой точности измерения взаимное положение интерферометра, СГ и исследуемой поверхности должно быть выдержано с точностью в доли микрометра вдоль оптической оси и по наклону в единицы угловых секунд. Необходимую точность юстировки достаточно просто обеспечить, располагая на одной подложке с основной СГ дополнительные дифракционные структуры, формируя вспомогательные интерферогаммы.

В качестве примера оценим типичные погрешности контроля асферики с применением СГ диаметром 50 мм и минимальным периодом структуры около 4 мкм (табл.2). Так как световой поток дважды проходит СГ, то погрешности удваиваются. С другой стороны, в таблице приведены максимальные значения погрешностей, а среднеквадратичные значения будут существенно меньше. Значительно увеличить точность можно, вычитая погрешность подложки из результатов измерения.

#### ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

В Институте автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН) разработано и создано лазерное записывающее устройство (генератор изображений) CLWS-300IAE для изготовления высококачественных дифракционных элементов в полярной системе координат [4]. Подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоян-

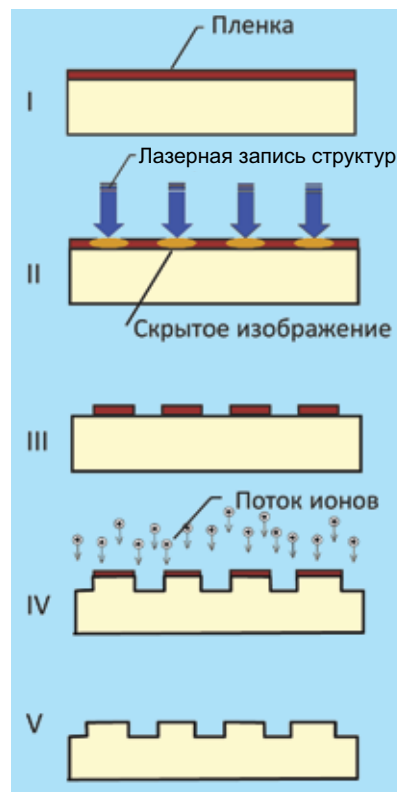


Рис.5. Изготовление микрорельефа СГ

ной угловой скоростью, в то время как сфокусированный

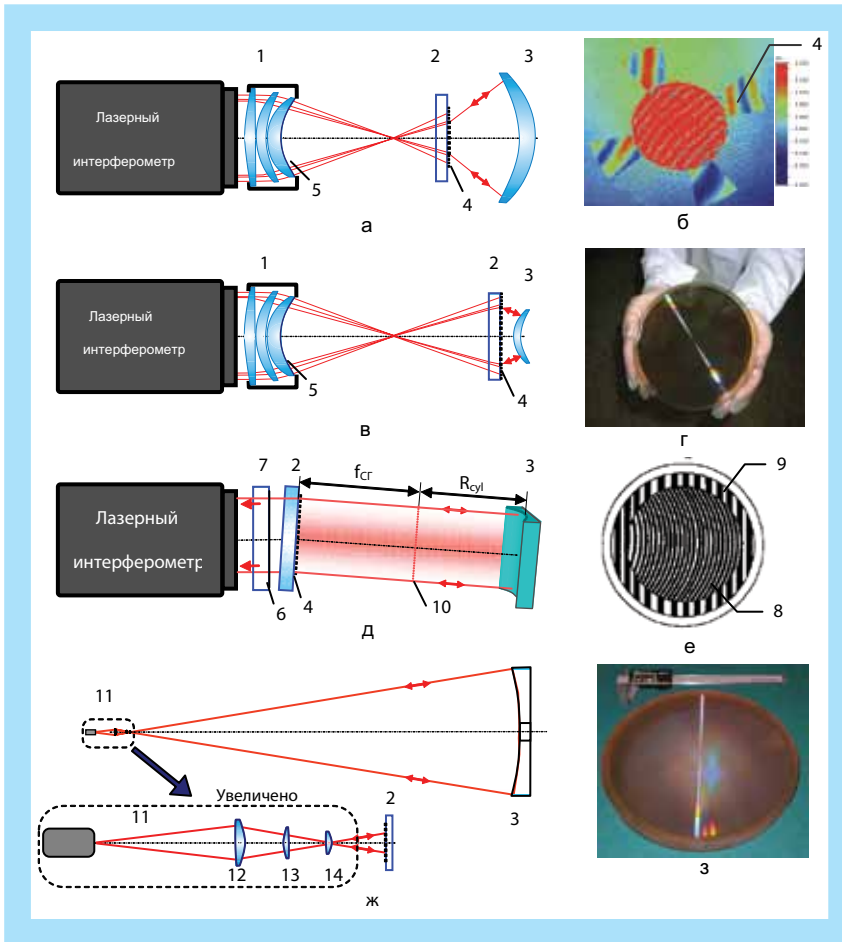


Рис.6. Оптические схемы контроля поверхностей: а) и б) – вогнутой; в) и г) – выпуклой; д) и е) – цилиндрической; ж) – асферических ; з) – линзового корректора

записывающий пучок лазерного излучения перемещается вдоль прямой линии, пересекающей центр вращения (рис.4а). Это позволяет достигать высокой скорости записи. В качестве светочувствительного материала мы используем пленки хрома, в которых под действием нагрева, вызванного лазерным излучением, возникает скрытое “термохимическое” изображение. Оно затем проявляется в селективном проявителе: чистый хром быстро растворяется, а экспонирован-

ные участки остаются. Таким образом, формируется микроструктура из хрома на поверхности пластины.

В дифракционной оптике используют элементы как с прямоугольным, так и с пилообразным профилем поверхности. На рис.5 показан разработанный в ИАиЭ СО РАН процесс создания микро рельефа СГ с прямоугольным профилем. Создание рельефа начинается с нанесения тонкой пленки хрома толщиной примерно 50–80 нм на поверхность оптической пластины (этап I).

Далее записывают структуры сфокусированным пучком мощного лазера с образованием скрытого изображения (этап II). После проявления (этап III) формируется микроструктура из хрома на поверхности пластины. Микро рельеф в стекле получают методом реактивного ионного травления (этап IV). На последнем этапе (V) остатки хрома стравливают. Таким путем изготавливают рельефные дифракционные структуры с минимальными размерами в доли микрометра.

## ПРИМЕНЕНИЕ СГ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В ИАиЭ СО РАН разработаны и реализованы на практике несколько основных вариантов контроля асферических поверхностей, ориентированных на использование коммерческих лазерных интерферометров “Физо” в сочетании с СГ.

### Контроль вогнутых асферических поверхностей (рис.6а)

Осесимметричная СГ (2) преобразует исходный волновой фронт лазерного интерферометра, сферический на выходе из эталонного объектива (1), в асферический, который точно соответствует форме контролируемой поверхности (3). То есть все лучи падают на поверхность (3) по нормали. Отраженный от поверхности (3) волновой фронт вторично проходит СГ и становится почти сферическим. Интерферометр измеряет разность фаз между этим фронтом и отраженным от апланатической эталонной поверхности (5). При контроле вогнутой поверхности размер СГ определяется размером каустики и может быть значительно меньше размера контролируемой асферики. То есть с помощью СГ диаметром, например, 40 мм, можно контролировать параболическое зеркало диаметром 4 м. Для точной юстировки СГ относительно интерферометра и поверхности (3) используются дополнительные голограммы (4), которые располагаются вне зоны основной СГ. С их помощью достаточно просто обеспечить контроль взаимного положения всех элементов

Таблица 3. Основные характеристики устройства

Максимальный диаметр области записи, мм	300
Толщина подложки, мм	1,5 – 24
Минимальная ширина записываемой структуры, мкм	0,6
Скорость вращения, об/с	12 – 15
Точность перемещения по радиусу (СКО), мкм	0,02
Точность определения угла поворота (СКО) угл. с	1
Длина волны записывающего лазера, нм	405; 532



Рис.7. Фотографии галактики, сделанные телескопом "Хаббл" до и после ремонта главного зеркала

оптической схемы с точностью в доли микрона по интерференционной картине (рис.6б).

#### Контроль выпуклых поверхностей (рис.6в)

СГ (2) рассчитывается таким образом, что при освещении сферическим волновым фронтом она формирует сходящийся асферический волновой фронт. В этом случае размер СГ должен обязательно превышать размеры контролируемой поверхности (3), что не всегда технически выполнимо. Однако возможен вариант этой схемы [5], когда перед асферикой устанавливается линза (или зеркало) необходимого размера, а небольшого размера СГ устанавливается в узкой части светового пучка. Вспомогательные СГ (4) используются для точной юстировки схемы контроля.

#### Контроль цилиндрических поверхностей (рис.6 д)

Для устранения автоколлимационного блика от контролируемой цилиндрической поверхности (3), СГ (2) обычно устанавливается в параллельном пучке света под небольшим углом к оптической оси ( $\alpha \sim 1^\circ$ ) [6]. Опорный плоский волновой фронт формируется при отражении от внешней поверхности (5) эталонной пластины (1). СГ состоит из двух зон (8) и (7), как показано на рис.6е. Центральная зона (8), дифракционная структура которой имеет вид фазовой зонной пластинки с параболической формой штрихов, формирует сходя-

щийся цилиндрический волновой фронт, наклоненный к оптической оси интерферометра под углом  $\alpha$ . Пучок фокусируется на фокусном расстоянии  $f_{СГ}$  от СГ, образуя линию (6). Контролируемая цилиндрическая поверхность устанавливается на расстоянии ее радиуса кривизны  $R_{суд}$  от линии (6) и отражает световой поток назад. Для точной юстировки

СГ в пространстве на подложку нанесена зона (7) с линейной отражательной дифракционной решеткой с периодом  $T = \lambda / \sin 2\alpha$ . Дифрагированный световой поток направляется точно назад, и по интерференционной картине можно точно установить СГ под углом  $\alpha$  (угол Литрова). **Контроль линзовых корректоров (рис.6ж)**

Главные зеркала больших телескопов проверяются интерферометрическим методом [7] из центра кривизны, используя линзовые корректоры (1), состоящие из нескольких линз (2, 3, 4), как показано на (рис.6ж). Корректор компенсирует асферичность волнового фронта, отражаемого от поверхности зеркала, и позволяет производить измерения его формы "нулевым методом" в процессе полировки. Однако всегда существует вероятность, что даже точно рассчитанный корректор может дать ошибку из-за неправильной сборки [8]. В этой связи

его сертификация имеет очень важное значение. Для сертификации корректоров используются дифракционные имитаторы зеркала телескопа [9] (отражательная голограмма (2) на рис.6ж), которые воспроизводят волновой фронт, отражаемый от главного зеркала с идеальной формой. Зеркала современных телескопов имеют очень большие относительные отверстия ( $D/f=0,75-1,2$ ), что приводит к необходимости для их контроля формировать асферические волновые фронты с отклонением от ближайшей сферы в несколько тысяч длин волн. При этом размер отражательных СГ превышает 200 мм при минимальном размере зон 0,5–0,6 мкм (рис.6з; 4 б,в).

## КОНТРОЛЬ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Толчком к началу широкого практического применения СГ для контроля асферических зеркал телескопов послужила история космического телескопа "Хаббл", когда его 2,4-метровое зеркало было отполировано без сертификации с помощью дифракционного имитатора. В результате форма зеркала отличалась от заданной всего на 0,5 мкм [16], однако это во много раз ухудшило разрешающую способность телескопа (рис.7). понадобилась специальная экспедиция в космос корабля "Шаттл" для ремонта этого телескопа.

Теоретические и практические основы расчета и синтеза осевых СГ для контроля асферической оптики были заложены в СССР школой К.С. Мустафина (ГИПО, Казань) в 70-е годы. Эти исследования в значительной степени опередили аналогичные работы, проводимые позднее в США. В 90-е годы предложенный в ИАиЭ СО РАН метод прямой лазерной записи в полярной системе координат был применен для изготовления дифракционных корректоров и имитаторов для контроля асферики и показал очень хоро-

шие результаты. Этот метод позволил создать прецизионные СГ для контроля любых асферических поверхностей (в том числе свободной формы) – от микролинз до гигантских зеркал телескопов как существующих, так и проектируемых. За последние несколько лет в ИАиЭ СО РАН были изготовлены СГ для контроля большого числа уникальных зеркал, в частности 6,5-метрового и 8,4-метрового зеркал (см. рис.5) телескопов "Магеллан" и "Большой бинокулярный телескоп (LBT)", созданных в Стюардской обсерватории университета Аризоны, Туссон, Аризона, США [10], а также 11-метрового зеркала телескопа SALT (ЮАР). Разработанные СГ позволили своевременно выявить и устранить ошибки при полировке зеркал. Эти телескопы уже приняты астрономами в эксплуатацию и дали первый свет. В настоящее время ИАиЭ СО РАН обеспечивает прецизионными СГ ведущие оптические предприятия России. Разработаны и изготовлены СГ для контроля 4,1-метрового зеркала телескопа VISTA, 1,7-метрового зеркала телескопа "Спектр-УФ", 3,7-метрового зеркала телескопа ARIES, 2-метрового зеркала телескопа TTL и многих других, создаваемых в ОАО ЛЗОС г. Лыткарино.

Технология прямой лазерной термохимической записи и комплекс прецизионного облучения на основе установки CLWS-300IAE позволяет изготавливать фазовые и амплитудные СГ с произвольной структурой диаметром от 0,5 до 300 мм, минимальным размером зон менее 0,6 мкм и погрешностью формирования структуры до 10–20 нм, что обеспечивает формирование заданных асферических волновых фронтов с погрешностью менее  $\lambda/100$  (СКО) для контроля практически любых асферических поверхностей.

Авторы благодарят коллектив лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН, создавший установку CLWS-300IAE и

развивающий направление синтеза дифракционной оптики.

## ЛИТЕРАТУРА

- Hentschel R., Braunecker B., Tiziani H.** Advanced optics using aspherical elements. – SPIE Press Book R., 2008, v. PM173.
- Полецук А., Коронкевич В., Корольков В. и др.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и измерения. – Автометрия, 1997, № 6.
- Arnold S., Maxey L., Rogers J. et al.** Figure metrology of deep aspherics using a conventional interferometer with CGH null. – Proc. SPIE, 1996, v. 2536.
- Poleshchuk A., Korolkov V.** Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements. – Proc. SPIE, 2007, 6732, 67320X.
- Pan F., Burge J., Anderson D. et al.** Efficient Testing of Segmented Aspherical Mirrors by Use of a Reference Plate and Computer-Generated Holograms. II. Case Study, Error Analysis, and Experimental Validation. – Appl. Opt., 2004, v. 43.
- Маточкин А., Черкашин В.** Дифракционное пробное стекло для контроля цилиндрической поверхности. – Автометрия, 2000, №4.
- Лукин А., Мустафин К.** Голографические методы контроля асферических поверхностей. – ОМП, 1979, №4.
- Allen L., Angel J., Mongus J. et al.** The Hubble Space Telescope optical system failure report. NASA report (1990, NASA, Washington, D.C., November).
- Ларионов Н., Лукин А., Рафиков Р.** Имитатор главного зеркала телескопа на основе синтезированной голограммы. – ОМП, 1980, №1.
- Burge J., Cherkashin V., Koronkevich V. et al.** Measurement of 6,5 and 8,4-meters aspherical mirrors shape by computer generated holograms. Труды оптического общества им. Д.С.Рожественского. Сб. трудов