

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2005, том 41, № 1

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 535.43

**Р. К. Насыров, А. Г. Полещук, В. П. Корольков,  
К. Прусс, С. Райхельт**

*(Новосибирск, Россия – Штутгарт, Фрайбург, Германия)*

**МЕТОДЫ СЕРТИФИКАЦИИ  
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ \***

Рассмотрена задача сертификации дифракционных оптических элементов (ДОЭ), применяемых для контроля асферических поверхностей. Исследованы методы совмещения двух фазовых функций пропускания в одном ДОЭ с целью формирования помимо основного асферического волнового фронта дополнительного сферического, результаты измерения которого могут быть использованы для сертификации асферического фронта. Проведен анализ ДОЭ, в котором совмещены две дифракционные структуры путем разбиения области элемента на ячейки, попеременно заполняемые фрагментами этих структур. Рассмотрены три варианта формы ячеек: кольца, прямые полосы и кольцевые сектора. Теоретически и экспериментально показано, что при использовании конфигурации с кольцевыми секторами вносимые погрешности ниже, чем при использовании деления на кольца или полосы. Численно рассчитано влияние взаимной интерференции в случае близких пространственных частот на ошибку интерференционных измерений сферического и асферического волновых фронтов и предложены пути его уменьшения.

**Введение.** Стремительный рост производства и применения асферической оптики в последнее десятилетие стимулировал развитие интерферометрических методов ее проверки. Аттестация оптических компонентов интерферометрами основана на сравнении эталонного волнового фронта и волнового фронта, сформированного исследуемым компонентом [1]. В случае асферической оптики необходимо использовать компенсатор, который преобразует плоский волновой фронт в асферический, совпадающий с расчетной формой исследуемой поверхности и обратно. Компенсатор для асферического волнового фронта достаточно сложно изготовить на основе компо-

\* Работа выполнена при поддержке программы «Наука ради мира» (НАТО) (грант № 973702).

нентов традиционной оптики. В последние годы в качестве компенсаторов широко используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [2, 3].

Проблема заключается в том, что компенсатор для асферического волнового фронта не может быть проверен стандартными методами. Возможна только аттестация косвенными методами, например предварительная проверка записывающей системы путем изготовления нескольких ДОЭ, создающих сферический волновой фронт. Эти ДОЭ проверяются интерферометрическими методами. Такая аттестация позволяет выявить систематические погрешности записывающей системы и учесть их при последующем изготовлении ДОЭ, формирующего асферический волновой фронт. Очевидно также, что она не позволяет выделить несистематические погрешности и гарантировать правильность изготовления компенсатора. Разработаны методы определения несистематических погрешностей непосредственно в процессе записи, например периодический поиск начала координат для осесимметричных ДОЭ [4]. Но поскольку невозможно обеспечить непрерывный мониторинг несистематических ошибок, то остается актуальной проблема сертификации самого дифракционного компенсатора, которая может быть осуществлена несколькими способами:

- прямым микрофотометрированием дифракционной структуры элемента [5];
- измерением с использованием дополнительного ДОЭ, имитирующего асферическую поверхность [3, 6];
- измерением с использованием комбинированного ДОЭ [7].

Первый способ требует применения сложных координатно-измерительных микроскопов с точностью выше точности системы, с помощью которой изготавливается ДОЭ (около 50 нм [4]). Второй способ не позволяет достоверно выявить погрешности изготовления, так как в нем идет сравнение двух ДОЭ, погрешности изготовления которых неизвестны или известны не полностью. С помощью третьего способа можно определить оба вида погрешностей изготовления, так как он основан на измерении формы сферического волнового фронта. Согласно этому подходу изготавливается ДОЭ [8], который преобразует входной волновой фронт в комбинацию сферического и асферического волновых фронтов. Существует так называемый пятипозиционный интерферометрический метод [7], который позволяет измерить все погрешности изготовленной дифракционной структуры ДОЭ, соответствующей сферическому волновому фронту. Если изготовление дифракционных структур, соответствующих сферическому и асферическому волновым фронтам, ведется одновременно, то внешние воздействия (например, изменения температуры), которые вносят погрешности, будут действовать на них одинаково. Зная погрешности дифракционной структуры, соответствующей сферическому фронту, можно вычислить погрешности структуры, соответствующей асферическому фронту. Таким образом, третий подход позволяет проводить сертификацию асферического волнового фронта. Однако ему свойственны собственные погрешности: при кодировании двух фазовых функций в одном ДОЭ появляются дополнительные паразитные дифракционные порядки и снижается дифракционная эффективность.

Целью предлагаемой работы являются поиск и исследование методов проектирования и сертификации ДОЭ для контроля асферической оптики, обеспечивающих минимальные погрешности сертификации и не вносящих заметных ошибок в асферический волновой фронт.

**1. Комбинированные ДОЭ.** Идея создания ДОЭ для формирования двух и более независимых волновых фронтов заключается в периодическом пространственном чередовании фазовых функций пропускания нескольких оптических элементов [8]. Для этого ДОЭ делится на элементарные ячейки, которые поочередно заполняются участками дифракционных структур, соответствующих двум волновым фронтам.

Распределение комплексной амплитуды за плоскостью комбинированного ДОЭ может быть представлено как

$$W_1(\mathbf{r}_1) = W_S(\mathbf{r}_1)[1 - S(\mathbf{r}_1)]/2 + W_A(\mathbf{r}_1)[1 + S(\mathbf{r}_1)]/2, \quad (1)$$

где  $S = -1$  в ячейках, соответствующих первому волновому фронту,  $S = +1$  в ячейках, соответствующих второму волновому фронту;  $W_S$  и  $W_A$  – распределения комплексных амплитуд сферического и асферического волновых фронтов единичной амплитуды соответственно;  $\mathbf{r}_1$  – координатный радиус-вектор в плоскости ДОЭ.

Выражение (1) может быть записано в виде

$$W_1(\mathbf{r}_1) = W_S(\mathbf{r}_1)/2 + W_A(\mathbf{r}_1)/2 + [W_A(\mathbf{r}_1) - W_S(\mathbf{r}_1)]S(\mathbf{r}_1)/2. \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что за плоскостью такого комбинированного ДОЭ волновой фронт состоит из трех компонентов. Первое и второе слагаемые в (2) описывают неискаженные сферический и асферический волновые фронты соответственно. Третье слагаемое описывает паразитную часть волнового фронта.

На рис. 1 показаны три типа конфигураций элементарных ячеек: концентрические кольца [8] (a), периодические полосы [9] (b) и кольцевые сектора (c). При использовании ячеек в виде кольцевых секторов ДОЭ делится на концентрические кольца равной ширины  $T$  вдоль радиальной координаты, а затем каждое кольцо, в свою очередь, делится на кольцевые сектора. Количество секторов в каждом следующем кольце больше, чем в предыдущем, на постоянное число; это число было выбрано равным 16.

**2. Анализ погрешностей формирования волновых фронтов комбинированным ДОЭ.** Разрывы функций пропускания комбинированного ДОЭ на границах ячеек приводят к паразитной дифракции, которая вносит погрешности в интерференционные измерения. Кроме того, имеет место взаимная интерференция формируемых волновых фронтов, если пространственные частоты дифракционных структур совпадают или кратны друг другу.

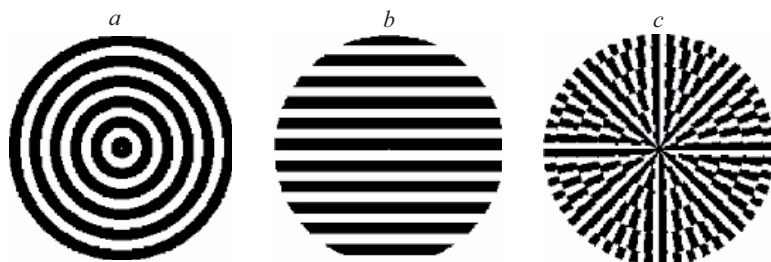


Рис. 1. Конфигурации ячеек комбинированных ДОЭ. Светлое поле – дифракционная структура первого волнового фронта, а темное поле – второго

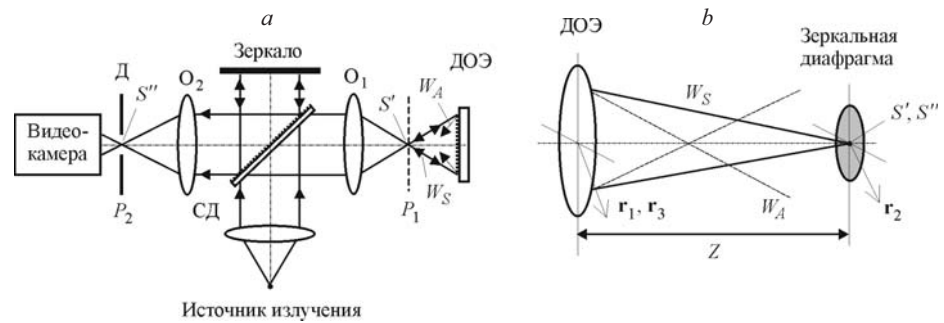


Рис. 2. Схема измерений: упрощенная оптическая схема интерферометра для определения погрешностей сферического волнового фронта (а) и эквивалентная схема для моделирования погрешностей (b)

Для оценки влияния этих погрешностей на точность интерферометрических измерений рассмотрим типовую схему интерферометра Тваймана – Грина [1], приведенную на рис. 2, а. Оптическое излучение источника (лазера) после отражения от светоделительного зеркала СД фокусируется объективом  $O_1$  в плоскости  $P_1$  (точка  $S'$ ) и затем освещает исследуемый комбинированный зеркальный осесимметричный ДОО. Этот элемент представляет собой комбинацию дифракционного аналога сферического зеркала (зонной пластинки) с радиусом кривизны  $Z$  и дифракционного аналога асферического зеркала. Дифрагировавшее на комбинированном ДОО оптическое излучение проходит объективы  $O_1$  и  $O_2$ , светоделительное зеркало, диафрагму Д и фиксируется видеокамерой (измерительный канал). Туда же поступает оптическое излучение, отраженное от зеркала (опорный канал), образуя интерференционную картину. Диафрагма Д в плоскости  $P_2$  служит для пространственной фильтрации оптического излучения, отраженного от ДОО.

Для анализа формирования интерференционной картины рассмотрим упрощенную эквивалентную схему, представленную на рис. 2, б. Так как плоскости  $P_1$  и  $P_2$  в схеме на рис. 2, а являются сопряженными, то диафрагму можно переместить из плоскости  $P_1$  в плоскость  $P_2$ . Считаем, что на ДОО падает идеальный пучок со сферическим волновым фронтом. В качестве исходного берется волновой фронт, отраженный от ДОО, далее мы рассчитываем его прохождение через диафрагму и попадание в видеокамеру. Если фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  объективов  $O_1$  и  $O_2$  разные, то введем фазовый множитель  $\exp(-r^2/2f_0)$ , где  $f_0 = f_1 f_2 / (f_1 + f_2)$ , перед  $W_1$  в выражении (2) и изменим диаметр диафрагмы в  $f_1/f_2$  раз. В данной работе  $f_1$  было принято равным  $f_2$ . Для упрощения анализа прохождение оптического излучения через диафрагму можно представить как отражение от зеркала с таким же диаметром (см. рис. 2, б). В дальнейшем ее будем называть зеркальной диафрагмой. Расстояние между ДОО и зеркальной диафрагмой равно  $Z$ , так как она расположена в центре кривизны сферического фронта. В этом случае форма волнового фронта анализируется в плоскости комбинированного ДОО, что соответствует плоскости видеокамеры на рис. 2, а.

Для расчета искажений, вносимых дифракцией света на границах ячеек, требуется найти распределение комплексной амплитуды в плоскости зеркальной диафрагмы (см. рис. 2, б), а затем в плоскости ДОО.

В рассматриваемом нами случае система обладает симметрией вращения, поэтому для решения задачи используются полярные координаты. Если

$W_1$  – исходное распределение комплексной амплитуды в плоскости ДОЭ, то распределение комплексной амплитуды в плоскости зеркальной диафрагмы в приближении дифракции Френеля определяется как

$$W_2(\mathbf{r}_2) = \frac{k}{2\pi iZ} \iint W_1(\mathbf{r}_1) e^{\frac{ik}{2Z}(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2} d^2r_1, \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_2$  – радиус-вектор в плоскости зеркальной диафрагмы;  $k$  – волновое число. Интегрирование ведется по поверхности ДОЭ, которая имеет вид круга с радиусом  $A$ .

Распределение комплексной амплитуды для отраженного пучка в плоскости ДОЭ имеет вид

$$W_3(\mathbf{r}_3) = -\frac{k}{2\pi iZ} \iint W_2(\mathbf{r}_2) e^{-\frac{ik}{2Z}(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2)^2} d^2r_2, \quad (4)$$

где  $\mathbf{r}_3$  – радиус-вектор в плоскости ДОЭ для отраженного пучка. Интегрирование ведется по площади зеркальной диафрагмы радиуса  $R$ . Введем функцию  $F$  – отношение комплексной амплитуды пучка к комплексной амплитуде, соответствующей сферическому волновому фронту:

$$F^{(i)}(r, \varphi) = W_i(r, \varphi) e^{\frac{ik}{2Z}r^2} \quad (5)$$

(где  $i=1$  для исходного волнового фронта,  $i=2$  для плоскости с зеркальной диафрагмой и  $i=3$  для волнового фронта в выходной плоскости), и представим ее в виде фурье-разложения по углу  $\varphi$ :

$$F^{(i)}(r, \varphi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} F_l^{(i)}(r) e^{il\varphi}, \quad (6)$$

где

$$F_l^{(i)}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F^{(i)}(r, \varphi) e^{-il\varphi} d\varphi. \quad (7)$$

В результате подстановки (3) в (4) и ряда преобразований получим выражение, связывающее фурье-гармоники функции  $F$  в выходной и входной плоскостях:

$$F_l^{(3)}(r_3) = \frac{kR}{Z} \int_0^A r_1 F_l^{(1)}(r_1) \frac{r_1 J_{l-1}\left(r_1 \frac{kR}{Z}\right) J_l\left(r_3 \frac{kR}{Z}\right) - r_3 J_{l-1}\left(r_3 \frac{kR}{Z}\right) J_l\left(r_1 \frac{kR}{Z}\right)}{r_3^2 - r_1^2} dr_1, \quad (8)$$

где  $F_l^{(1)}$  и  $F_l^{(3)}$  – фурье-гармоники функции  $F$  в плоскости ДОЭ и выходной плоскости соответственно;  $J_n$  – функция Бесселя  $n$ -го порядка. Для расчетов  $R = 50$  мкм, что соответствует радиусу диафрагмы интерферометра. Интеграл в (8) рассчитывался численно. Отметим, что  $l$ -я фурье-гармоника фронта

в выходной плоскости связана с единственной фурье-гармоникой фронта во входной плоскости с тем же номером  $l$ , что существенно сокращает время расчетов.

Если входящая волна сферическая с радиусом  $Z$ , т. е.  $F^{(1)} = 1$ , то и в выходной плоскости окажется такая же сферическая волна, т. е.  $F^{(3)} = 1$ . При использовании комбинированной дифракционной структуры возникают флуктуации амплитуды  $\delta A$  и фазы  $\delta\phi$ . В этом случае функция  $F$  для волнового фронта, отличающегося от сферического, может быть оценена как

$$F^{(3)} \approx (1 + \delta A)e^{i\delta\phi} \approx 1 + \delta A + i\delta\phi, \quad (9)$$

где  $\delta A \ll 1$  и  $\delta\phi \ll 1$  – малые отклонения амплитуды и фазы волны соответственно. Отсюда видно, что для расчета ошибки волнового фронта в выходной плоскости требуется взять мнимую часть от  $F^{(3)}$ . Наиболее просто получить  $F_l^{(1)}$  для ячеек в виде колец. В этом случае структура ДОЭ обладает симметрией вращения, следовательно, имеется только одна гармоника (с  $l=0$ ), неравная нулю, т. е.

$$F_0^{(1)} = F^{(1)}. \quad (10)$$

При использовании ячеек в виде полос функция  $S(x, y)$  по координате  $y$  имеет вид периодической функции, принимающей значение  $+1$  либо  $-1$ , и может быть представлена рядом Фурье:

$$S(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} \left( \cos \frac{2\pi(2n+1)}{T} y \right), \quad (11)$$

где  $T$  – период полос. Тогда в полярных координатах получим

$$S(r, \phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} \cos \left( \frac{2\pi(2n+1)}{T} r \sin\phi \right). \quad (12)$$

Благодаря тому что волновые фронты  $W_S$  и  $W_A$  обладают симметрией вращения, т. е. не зависят от угловой координаты, фурье-гармоники зависят только от конфигурации комбинирования, т. е. от функции  $S$ . Для того чтобы извлечь  $l$ -ю гармонику, выделим из функции  $F_l^{(1)}$  часть, зависящую только от  $S$ :  $F_l^{(1)} = F_{\text{rad}}(r)S(r)$ , где  $F_{\text{rad}}(r) = 0,5(W_A - W_S) \exp(ikr^2/2Z)$ . Тогда фурье-гармоники вычисляются в явном виде:

$$F_l(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi F_{\text{rad}}(r) e^{-i\phi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} \cos \left( \frac{2\pi(2n+1)}{T} r \sin\phi \right) =$$

$$= \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} F_{\text{rad}}(r) J_l \left( \frac{2\pi(2n+1)}{T} r \right) & \text{при } l \text{ четном;} \\ 0 & \text{при } l \text{ нечетном.} \end{cases} \quad (13)$$



При использовании деления ДОЭ на кольцевые сектора в пределах одного кольца по угловой координате функция  $S$  меняется в выбранной нами конфигурации (см. разд. 1) периодически, следовательно, можно разделить угловой и радиальный компоненты функции  $F$ :  $F(r, \varphi) = F_{\text{rad}}(r)e^{\frac{i16m}{Z}\varphi}$ , где  $m$  – номер кольца. В таком случае гармоники будут выглядеть следующим образом:  $F_l(r) = F_{\text{rad}}(r)$ ,  $(m-1)T \leq r \leq mT$ , причем  $l = 8m$ . Поскольку функции  $e^{im\varphi}$  с различными  $m$  ортогональны между собой, то интегрирование при вычислении  $l$ -й гармоники выходного фронта ведется не по всей поверхности, а лишь по  $m$ -му кольцу:

$$F_l(r_3) = \frac{kR}{Z} \int_{(2m-1)T}^{2mT} dr_1 r_1 F_l(r_1) \frac{r_1 J_{l-1}\left(r_1 \frac{kR}{Z}\right) J_l\left(r_3 \frac{kR}{Z}\right) - r_3 J_{l-1}\left(r_3 \frac{kR}{Z}\right) J_l\left(r_1 \frac{kR}{Z}\right)}{r_3^2 - r_1^2}. \quad (14)$$

В результате численных расчетов с использованием выражений (8), (10), (13) и (14) были получены распределения для оценки погрешностей формы волнового фронта (рис. 3,  $a-c$ ) и ошибок, вносимых асферическим волновым фронтом (рис. 3,  $d$ ). При расчетах использовались значения радиуса зеркальной диафрагмы  $R = 50$  мкм, период ячеек  $T = 40$  мкм, радиус ДОЭ  $A = 16$  мм и длина волны  $\lambda = 0,633$  мкм. Радиус кривизны сферического волнового фронта  $Z = 60$  мм, а фаза асферического фронта представлена полиномом

$$\arg[W_A(r_1)] = \pi a_1 r_1^2 + \pi a_2 r_1^3 + \pi a_3 r_1^4, \quad r_1 \geq 0,$$

где  $a_1 = 17,48 \text{ мм}^{-2}$ ;  $a_2 = -0,415 \text{ мм}^{-3}$ ;  $a_3 = 0,031 \text{ мм}^{-4}$ .

Полученные результаты показали, что комбинированные дифракционные структуры с указанными выше параметрами дают погрешности волнового фронта  $0,065\lambda$  (полный размах ошибки (PV)) и  $4,3 \cdot 10^{-4}\lambda$  (среднеквадратичное отклонение (RMS)) для концентрических колец,  $0,057\lambda$  и  $2,2 \cdot 10^{-6}\lambda$  для периодических полос. В то же время деление на кольцевые сектора вносит существенно меньшую погрешность, равную  $10^{-6}\lambda$  и  $7,5 \cdot 10^{-8}\lambda$ . Погрешность, вносимая асферическим волновым фронтом, составляет  $0,060\lambda$  и  $3,2 \cdot 10^{-4}\lambda$ .

**3. Эксперимент.** Для экспериментальной проверки численных расчетов было изготовлено три типа отражательных осесимметричных ДОЭ: с ячейками в виде концентрических колец, периодических полос и кольцевых секторов. Комбинированные ДОЭ изготавливались по параметрам, используемым при расчетах в разд. 2. Характерный размер ячеек ДОЭ был выбран достаточно малым, для того чтобы свет, дифрагировавший на границах ячеек, не попадал в диафрагму, но в то же время был достаточно большим по сравнению с периодом дифракционной структуры.

ДОЭ изготавливались с использованием круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) CLWS-300 в Институте технической оптики университета г. Штутгарта (Германия) по термохимической технологии [10] на пленках хрома (толщина  $\sim 80$  нм), нанесенных на высококачественные ( $\lambda/20$ ) пластины из плавленого кварца. При минимальном периоде дифракционной

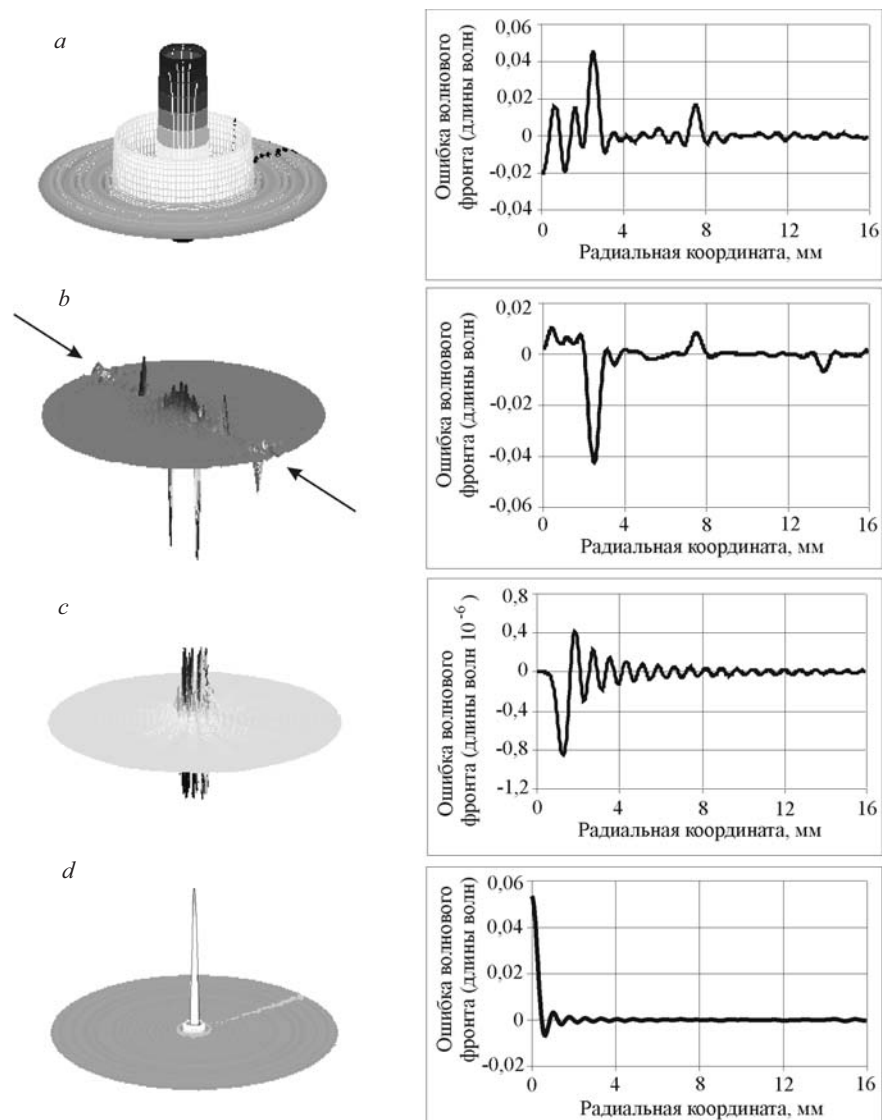


Рис. 3. Отклонение фазы волнового фронта, сформированного различными типами комбинированных ДОЭ, от сферической формы: с концентрическими кольцами (а); периодическими полосами (стрелками указано сечение) (b) и кольцевыми секторами (с). Отклонение от сферической формы, обусловленное влиянием асферического волнового фронта (d). Слева показаны трехмерные распределения фаз, а справа – радиальные сечения этих распределений

структуры 1,2 мкм собственные некомпенсируемые погрешности КЛЗС составляли около 0,10–0,15 мкм, что приводило к погрешностям волнового фронта изготовленных ДОЭ порядка  $\lambda/10$ . На рис. 4 показаны микрофотографии поверхностей изготовленных ДОЭ трех типов.

Измерения формы волнового фронта, отраженного от изготовленных ДОЭ, производились на длине волны  $\lambda = 633$  нм с помощью интерферометра Тваймана – Грина фирмы “Fisba” типа  $\mu$ Phase DCI2 (см. рис. 2, а). Дрейф центра вращения подложки периодически измерялся в процессе записи, и



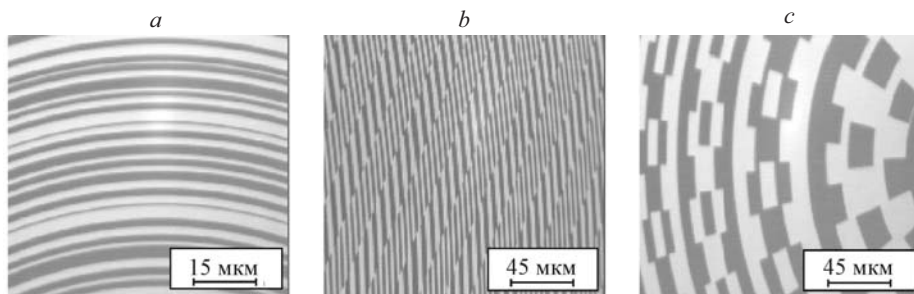


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей комбинированных ДОЭ: в виде концентрических колец (а), периодических полос (b), кольцевых секторов (с)

эти данные использовались затем при обработке интерферограмм по методике, описанной в работе [4]. Таким образом, уменьшалась несистематическая погрешность. Результаты измерений (фазовые карты) приведены на рис. 5.

На фазовой карте, полученной с использованием ДОЭ с кольцевой конфигурацией ячеек (рис. 5, а), в центре хорошо видна погрешность волнового фронта (светлое кольцо), обусловленная, по-видимому, совпадением пространственных частот дифракционной структуры зонной пластинки и концентрических кольцевых ячеек. Для ДОЭ с ячейками в виде полос видна характерная погрешность волнового фронта (рис. 5, b), которая ориентирована перпендикулярно этим ячейкам и связана с взаимной интерференцией между волновыми фронтами, сформированными дифракционной структурой ДОЭ и границами ячеек. Ошибки волнового фронта имеют вид дуг, уменьша-

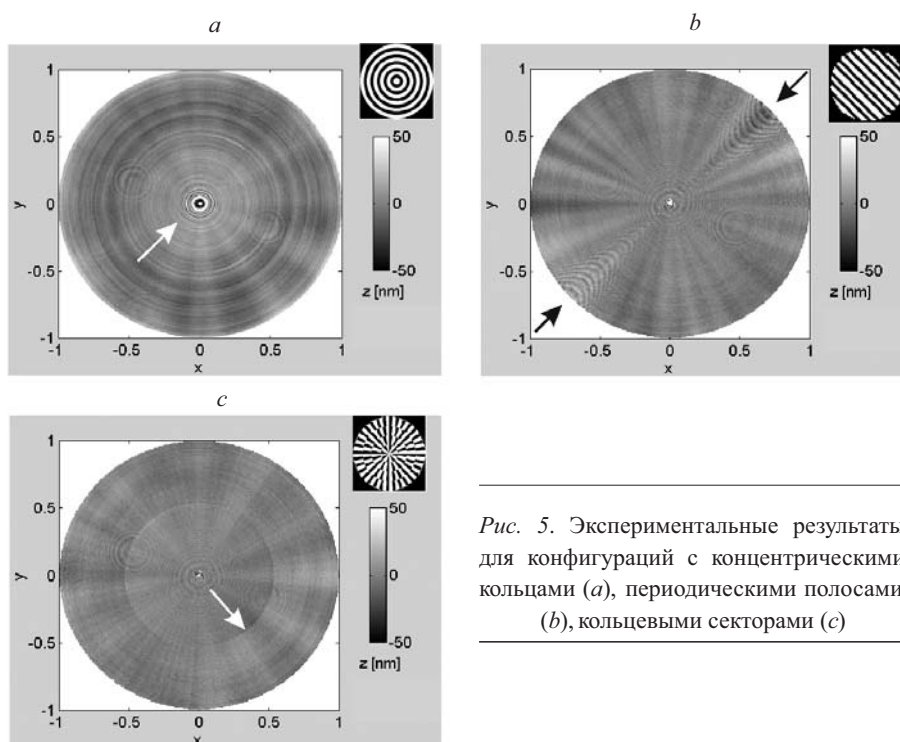


Рис. 5. Экспериментальные результаты для конфигураций с концентрическими кольцами (а), периодическими полосами (b), кольцевыми секторами (с)

ющихся к центру. Это связано с тем, что дифракционная структура представляет собой кольца и при уменьшении радиуса локально уменьшается область взаимной интерференции между дифракционными порядками, сформированными дифракционной структурой и границами ячеек. Для конфигурации ДОЭ с кольцевыми секторами (рис. 5, с) явных ошибок не отмечено (стрелкой указана ошибка, связанная со случайным сбоем в процессе изготовления данного экземпляра ДОЭ). Результаты измерения среднеквадратичной погрешности (4,7 нм) формы волнового фронта, приведенные на рис. 5, а–с, также показывают, что вариант комбинированного ДОЭ с кольцевыми секторами является предпочтительным. Таким образом, полученные экспериментальные данные качественно подтверждают результаты численного моделирования (см. рис. 3). Тем не менее использование ячеек в виде колец может быть эффективно в том случае, когда пространственные частоты двух совмещаемых дифракционных структур не пересекаются. На практике пересечение пространственных частот имеет место вблизи центра ДОЭ, где ширина зон обычно велика и погрешность изготовления пренебрежимо мала. Следовательно, нет необходимости в сертификации центральной области.

**Закключение.** Показана возможность сертификации дифракционного компенсатора для проверки асферики через измерение ошибок сферического волнового фронта, формируемого второй дифракционной структурой, встроенной в этот компенсатор.

Проведен анализ погрешностей волнового фронта, вносимых в интерференционные измерения асферических поверхностей тремя типами комбинированных ДОЭ с ячейками в виде концентрических колец, периодических полос и кольцевых секторов. Численные расчеты проводились для структур с минимальным периодом 1,2 мкм, при этом теоретическая ошибка волнового фронта составила для концентрических колец  $0,065\lambda$ , а для периодических полос  $0,057\lambda$ . При делении поверхности на кольцевые сектора теоретическая погрешность была существенно меньше ( $10^{-6}\lambda$ ). Кроме того, при разбиении ДОЭ на ячейки любой формы присутствует ошибка за счет взаимного пересечения пространственных частот кодируемых фазовых функций, которая в нашем случае составила  $0,060\lambda$  и может быть легко устранена удалением дополнительной дифракционной структуры из центральной области ДОЭ с радиусом  $\sim 1$  мм. Результаты экспериментального исследования подтвердили для случая кольцевых секторов практическое отсутствие ошибок волнового фронта, связанных с разбиением ДОЭ на ячейки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985.
2. Лукин А. В., Мустафин К. С. Голографические методы контроля асферических поверхностей // ОМП. 1979. № 4. С. 53.
3. Burge J. H. Certification of null correctors for primary mirrors // Proc. SPIE. 1994. 3749. P. 248.
4. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. и др. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их измерение // Автометрия. 1997. № 6. С. 42.
5. Ларионов Н. П., Лукин А. В., Рафиков Р. А. Контроль точности синтезированных голограмм // ОМП. 1980. № 1. С. 39.

6. **Полещук А. Г., Чури́н Е. Г., Корольков В. П.** Гибридная рефракционно-дифракционная нулевая система для интерферометрического контроля светосильных асферических поверхностей // Компьютерная оптика. 2000. **20**. С. 76.
7. **Reichelt S., Tiziani H. J.** Twin – CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry // Opt. Commun. 2003. **220**. P. 23.
8. **Poleshchuk A. G., Burge J. H., Churin E. G.** Design and application of CGHs for simultaneous generating several specified wavefronts // Diffractive Optics. Jena, Germany. 1999. **22**. P. 155.
9. **Poleshchuk A. G., Asfour J. M.** CGHs as Fizeau reference for interferometric null testing // Trends in Optics and Photonics (TOPS). (OSA Topical Meeting "DOMO-02".) Tucson, USA, 2002. **75**. P. 41.
10. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
Институт технической оптики  
(Университет г. Штутгарта),  
Институт технологии микросистем  
(Университет г. Фрайбурга),  
E-mail: nasyrov\_rk@iae.nsk.su  
pruss@ito.uni\_stuttgart.de  
reichelt@imtek.de*

*Поступила в редакцию  
29 сентября 2003 г.*