

УДК 535.421

Изготовление голограммных компенсаторов и контроль их погрешностей

*Костюченко А. В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Одинокоев С.Б., д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
odinokov@bmstu.ru*

Известны два способа изготовления СГ:

1) Первый способ – фотолитография. Точность выполнения структур не ниже 0,1 мкм (как правило, она порядка $\lambda/10$). Дифракционная эффективность около 38% (центральный ДОЭ), 10% (вспомогательные ДОЭ) и 2,5% (ДОЭ-имитатор). Минус способа в том, что нужно контролировать фокусное расстояние лазера и следить за его стабильностью.

2) Второй способ – вытачивание рельефа на круговых делительных машинах. Из-за небольшого стачивания резца нужно перед изготовлением очередной голограммы изменять его положение. Толщина кончика резца 1 нм. С помощью одного резца можно изготовить 10 голограмм. Точность изготовления голограммы зависит от погрешностей отображения её структуры и дефектов подложки. она также порядка $\lambda/10$. Дифракционная эффективность центрального ДОЭ приблизительно та же.

Оптические информационные технологии, элементы и системы. Методы сертификации ДОЭ для контроля асферической оптики. В случае асферической оптики для измерения расположения элементов или контроля формы необходимо использовать компенсатор, который преобразует плоский волновой фронт в асферический, совпадающий с расчетной формой исследуемой поверхности и обратно. Из-за наличия несистематических ошибок остается актуальной проблема сертификации самого компенсатора. Её можно решить, используя дополнительный ДОЭ, имитирующий сферическую поверхность. Комбинированный ДОЭ делится на элементарные ячейки, поочередно заполняемые участками дифракционных структур, соответствующих двум волновым фронтам: сферическому и асферическому.

Распределение комплексной амплитуды за плоскостью комбинированного ДОЭ

$$W_1(r_1) = W_S(r_1)/2 + W_A(r_1)/2 + [W_A(r_1) - W_S(r_1)][1 + S(r_1)]/2 \quad (1)$$

где $S = -1$ в ячейках, соответствующих первому волновому фронту (ВФ), $S = +1$ в ячейках, соответствующих второму ВФ; W_S и W_A -распределения комплексных амплитуд сферического и асферического ВФ единичной амплитуды соответственно; r_1 - координатный радиус-вектор в плоскости ДОЭ. Первое и второе слагаемые в (1) описывают неискаженные сферический и асферический ВФ соответственно. Третье слагаемое - паразитную часть ВФ.

На рис. 1 показаны три типа конфигураций элементарных ячеек: концентрические кольца (а), периодические полосы (b) и кольцевые сектора (с). При использовании ячеек в виде кольцевых секторов ДОЭ делится на концентрические кольца равной ширины. Количество секторов в каждом следующем кольце больше, чем в предыдущем, на постоянное число; здесь оно выбрано равным 1.

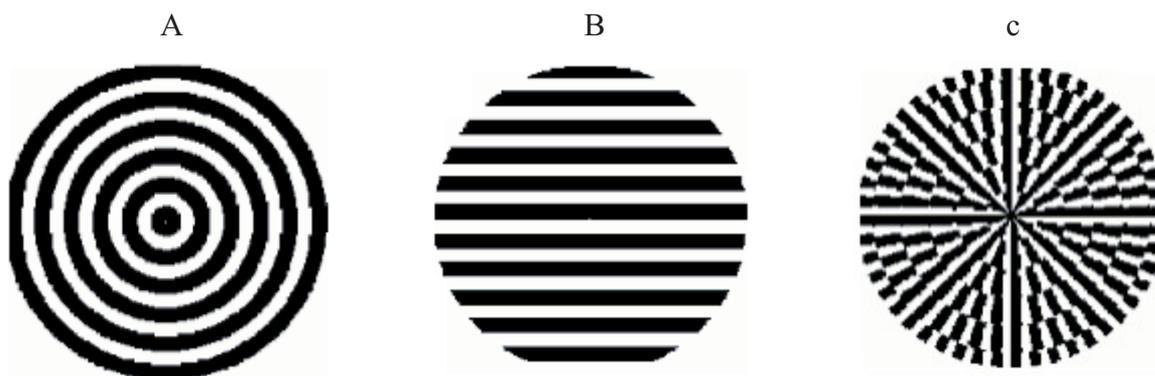


Рис. 1. Конфигурация ячеек комбинированного ДОЭ. Светлое поле – дифракционная структура первого волнового фронта, а тёмное поле – второго

Анализ погрешностей формирования волновых фронтов комбинированным ДОЭ. Разрывы функций пропускания комбинированного ДОЭ на границах ячеек приводят к паразитной дифракции. Кроме того, формируемые ВФ интерферируют, если пространственные частоты дифракционных структур кратны друг другу. Для оценки влияния этих погрешностей на точность интерферометрических измерений рассмотрим типовую схему интерферометра Тваймана-Грина, приведенную на рис. 2а. Оптическое излучение лазера после отражения от светоделительного зеркала СД фокусируется объективом O_1 в плоскости P_1 (точка S') и затем освещает исследуемый зеркальный ДОЭ. Этот элемент представляет собой комбинацию зонной пластинки с радиусом кривизны Z и

дифракционного аналога асферического зеркала. Далее 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 ДОЭ.

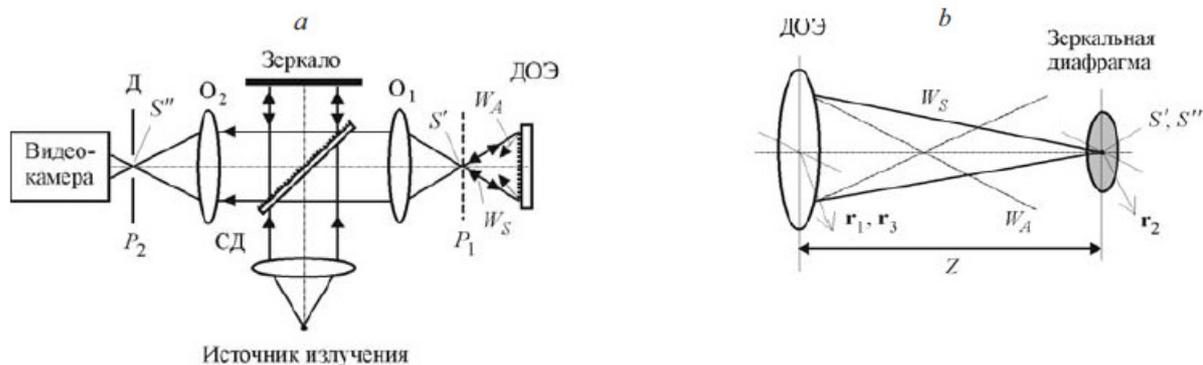


Рис. 2. Схема измерений: а) упрощённая оптическая схема интерферометра для определения погрешностей сферического ВФ; б) эквивалентная схема для моделирования погрешностей

Для анализа формирования интерференционной картины рассмотрим упрощенную эквивалентную схему, представленную на рис. 2б. Для сопряжённых плоскостей P_1 и P_2 в схеме на рис. 2а диафрагму можно переместить из плоскости P_1 в плоскость P_2 . Считаем, что на ДОЭ падает идеальный пучок со сферическим ВФ. В качестве исходного берется ВФ, отраженный от ДОЭ, далее мы рассчитываем его прохождение через диафрагму и попадание в видеокамеру. В общем случае для объективов O_1 и O_2 фазовый множитель имеет вид $\exp(-r^2/2f_0)$, 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 было принято: $f_1 = f_2$. Прохождение оптического излучения через диафрагму можно представить как отражение от зеркала с таким же диаметром (см. рис. 2б). Расстояние между ДОЭ и зеркалом равно Z , так как она расположена в центре кривизны сферического фронта. В этом случае форма ВФ анализируется в плоскости комбинированного ДОЭ, что соответствует плоскости видеокамеры на рис. 2а.

Для расчета искажений из-за дифракции на границах ячеек, требуется найти распределение комплексной амплитуды в плоскости зеркальной диафрагмы (см. рис. 2б), а затем в плоскости ДОЭ.

Связь фурье-гармоник функций F на входе и выходе

$$F_1^{(3)}(r_3) = \frac{kR}{Z} \int_0^A r_1 F_1^{(1)}(r_1) \frac{r_1 J_{l-1}(r_1 \frac{kR}{Z}) J_l(r_3 \frac{kR}{Z}) - r_3 J_{l-1}(r_3 \frac{kR}{Z}) J_l(r_1 \frac{kR}{Z})}{r_3^2 - r_1^2} dr_1 \quad (2)$$

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, k - волновое число, r_3 – радиус-вектор в плоскости ДОЭ для отражённого пучка, F – отношение комплексной амплитуды пучка к комплексной амплитуде сферического ВФ. Для расчетов радиус диафрагмы интерферометра $R = 50$ мкм. 1-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. $F^{(1)} = 1$, в выходной плоскости окажется такая же сферическая волна, т. е. $F^{(3)} = 1$. При использовании комбинированной дифракционной структуры возникают флуктуации амплитуды δA и фазы $\delta\varphi$.

Оценка функции F для волнового фронта, отличающегося от сферического

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

где $\delta A \ll 1$ и $\delta\varphi \ll 1$ - малые отклонения амплитуды и фазы волны соответственно. Ошибки ВФ в выходной плоскости - мнимая часть от $F^{(3)}$. Для ячеек в виде колец структура ДОЭ обладает симметрией вращения и остаётся лишь одна ненулевая гармоника

$$F_0^{(1)} = F^{(1)} \quad (4)$$

Для ячеек в виде полос функция $S(r, \varphi)$ по координате y имеет вид периодической функции, принимающей значение $+1$ либо -1 , где T – период полос

$$S(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} \cos\left(\frac{2\pi(2n+1)}{T} r \sin \varphi\right) \quad (5)$$

так как ВФ W_S и W_A обладают симметрией вращения, фурье-гармоники не зависят от φ . Выделив явную часть, зависящую только от S : $F_l^{(1)} = F_{rad}(r)S(r)$, где $F_{rad}(r) = 0.5(W_A - W_S) \exp(ikr^2/2z)$, получим 1-ю гармонику

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

$$= \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} F_{\text{rad}}(r) J_l\left(\frac{2\pi(2n+1)}{T} r\right) & \text{при } l \text{ четном;} \\ 0 & \text{при } l \text{ нечетном.} \end{cases} \quad (6)$$

При использовании деления ДОО на кольцевые сектора в пределах одного кольца по угловой координате функция S меняется периодически и можно разделить угловой и радиальный компоненты функции F : $F(r, \varphi) = F_{\text{rad}}(r) e^{im\varphi}$, где m – номер кольца. Поскольку функции $e^{im\varphi}$ с различными m взаимно ортогональны, интегрировать можно по m -му кольцу

$$F_l(r_3) = \frac{kR}{Z} \int_{(2m-1)T}^{2mT} dr_1 r_1 F_1(r_1) \frac{r_1 J_{l-1}\left(r_1 \frac{kR}{Z}\right) J_l\left(r_3 \frac{kR}{Z}\right) - r_3 J_{l-1}\left(r_3 \frac{kR}{Z}\right) J_l\left(r_1 \frac{kR}{Z}\right)}{r_3^2 - r_1^2} \quad (7)$$

В результате численных расчетов с использованием выражений (3), (5), (6) и (7) были получены распределения для оценки погрешностей формы ВФ (рис. 3, а-с) и ошибок, вносимых асферическим ВФ (рис. 3d). При расчетах использовались значения радиуса зеркальной диафрагмы $R = 50$ мкм, период ячеек $T = 40$ мкм, радиус ДОО $A = 16$ мм и длина волны $\lambda = 0,633$ мкм.

Радиус кривизны сферического ВФ $Z = 60$ мм, а фаза асферического фронта представлена полиномом

$$\arg[W_A(r_1)] = \pi a_1 r_1^2 + \pi a_2 r_1^3 + \pi a_3 r_1^4, r_1 \geq 0 \quad (8)$$

где $a_1 = 17.48$ мм⁻²; $a_2 = -0.415$ мм⁻³; $a_3 = 0.031$ мм⁻⁴.

Полученные результаты показали, что комбинированные дифракционные структуры с указанными выше параметрами дают погрешности ВФ $0,065\lambda$ (полный размах ошибки) и $4,3 \cdot 10^{-4} \lambda$ (среднеквадратичное отклонение) для concentрических колец, $0,057\lambda$ и $2,2 \cdot 10^{-6} \lambda$ для периодических полос. Деление на кольцевые сектора вносит существенно меньшую погрешность, равную $10^{-6} \lambda$ и $7,5 \cdot 10 \cdot 10^{-8} \lambda$. Погрешность, вносимая асферическим ВФ, составляет $0,060\lambda$ и $3,2 \cdot 10^{-4} \lambda$.

Эксперимент. Для экспериментальной проверки численных расчетов были изготовлены ДОО (рис. 3). Глубина ячеек ДОО была выбрана достаточно малой, чтобы не

пропустить через диафрагму свет, дифрагировавший на границах ячеек, и достаточно большим по сравнению с периодом дифракционной структуры.

ДОЭ изготавливались с использованием круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) CLWS-300. При минимальном периоде дифракционной структуры 1,2 мкм собственные некомпенсируемые погрешности КЛЗС составляли около 0,10-0,15 мкм, что приводило к погрешностям ВФ изготовленных ДОЭ порядка $\lambda / 10$. На рис. 4 показаны микрофотографии поверхностей изготовленных ДОЭ трех типов (с зонами в виде колец (а), полос (b) и кольцевых секторов (с)).

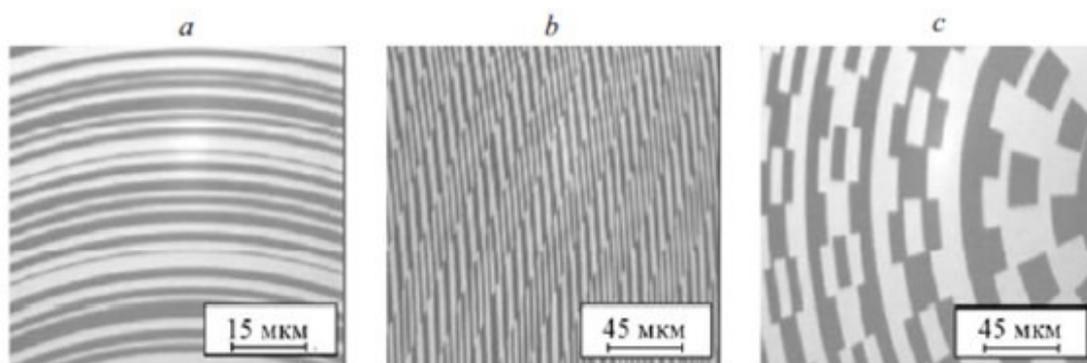


Рис. 3. Микрофотография поверхностей комбинированных ДОЭ

Измерения формы ВФ, отраженного от изготовленных ДОЭ, производились на длине волны $\lambda = 633$ нм с помощью интерферометра Тваймана - Грина (см. рис. 2, а). Значения дрейфа центра вращения подложки использовались при обработке интерферограмм. Результаты измерений приведены на рис. 4. На рис. 4а, в центре есть погрешность ВФ (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 ВФ (рис. 4с), которая связана с взаимной интерференцией между волновыми фронтами, сформированными дифракционной структурой ДОЭ и границами ячеек. Ошибки ВФ имеют вид дуг, уменьшающихся к центру, так как 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. 4b) явные ошибки вызваны случайным сбоем (показано стрелкой) в процессе изготовления данного экземпляра ДОЭ.

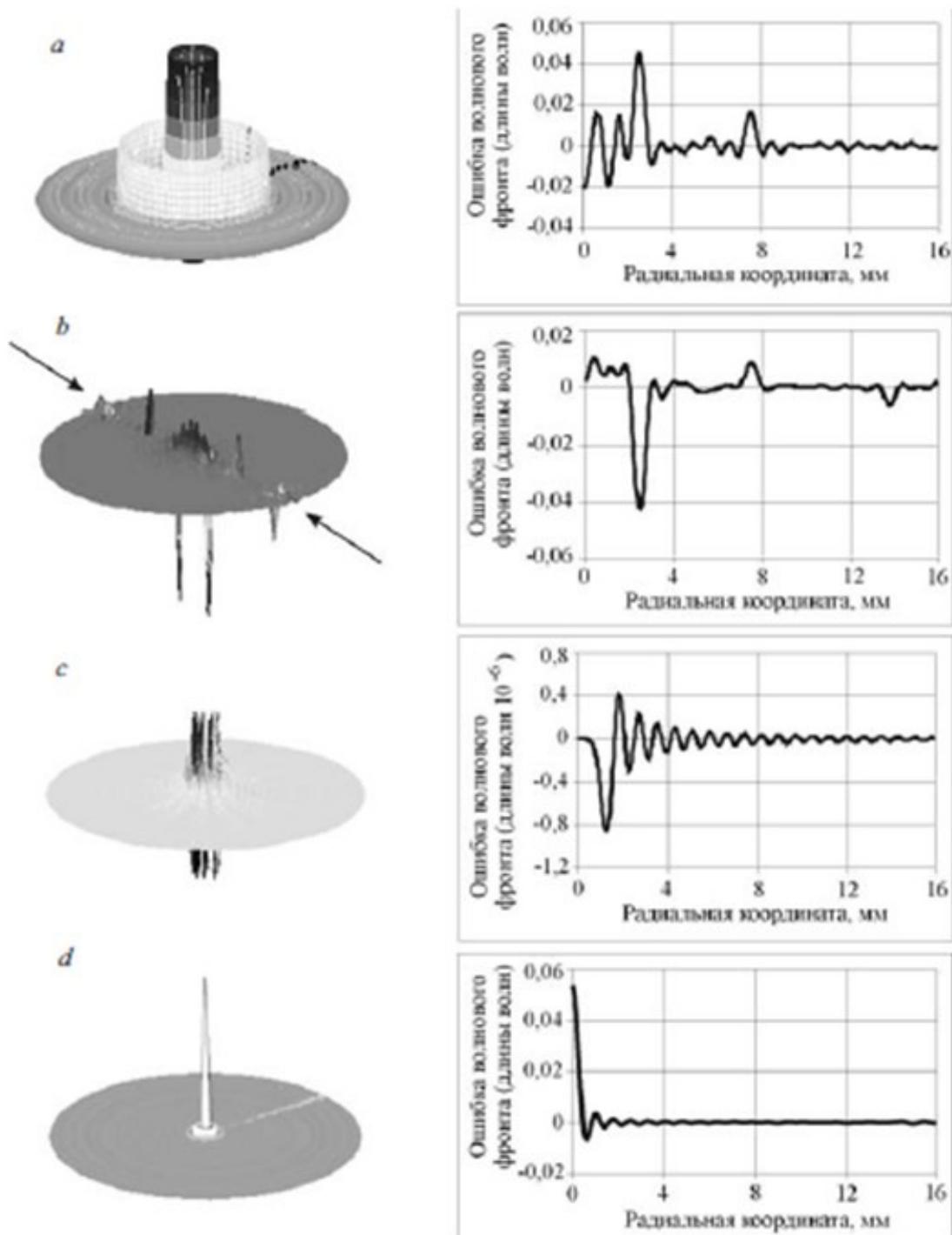


Рис. 4. Отклонение фазы ВФ от сферического для голограмм: а) с концентрическими кольцами; б) с кольцевыми секторами; в) с периодическими полосами; д) влияние асферического ВФ

Результаты измерения среднеквадратичной погрешности (4,7 нм) формы ВФ, приведенные на рис. 3.5, а-с, также показывают, что вариант комбинированного ДОЭ с кольцевыми секторами является предпочтительным. Таким образом, подтвердились результаты численного моделирования (см. рис. 4). Тем не менее, использование ячеек в

виде колец может быть эффективно в том случае непересечения пространственных частот совмещаемых дифракционных структур. На практике необходимости в сертификации центральной области нет, так как пересечение пространственных частот имеет место вблизи центра ДОЭ, где ширина зон обычно велика и погрешность изготовления пренебрежимо мала.

Список литературы

1. Насыров Р.К., Полещук А.Г., Корольков В.П., Прусс К., Райхельт С. Методы сертификации дифракционных оптических элементов для контроля асферической оптики // Автометрия. 2005. Т. 41. №1. С. 115-125.
2. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Ньюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А. Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 23-32.
3. Полещук А.Г., Коронкевич В.П., Корольков В.П., Седухин А.Г. Применение дифракционной оптики в измерительной технике // Компьютерная оптика. 2001. Т. 22. С. 86-95.