

МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННЫХ И КОНФОРМАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

А.Г. Полещук¹, В.П. Корольков¹, Р.К. Насыров¹, В.Н. Хомутов¹, А.С. Конченко¹

¹Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация

Развитие специализированных неразрушающих методов контроля оптических элементов с микрорельефом необходимо для освоения производства дифракционных, микрооптических и конформальных элементов. В лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН разработано и исследовано несколько различных подходов к характеризации разнообразных типов оптических элементов с микрорельефом на промежуточных и финальной стадии их изготовления, направленных на контроль погрешностей волнового фронта, глубины травления и дифракционной эффективности бинарных и многоуровневых элементов. В работе дан обзор разработанных методик и измерительных схем с учетом специфики параметров контролируемых элементов и областей их применения. Приведены результаты контроля конкретных изготовленных элементов.

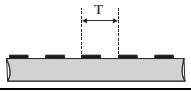
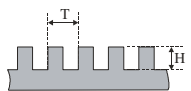
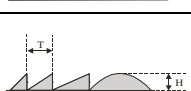


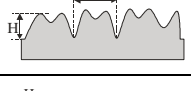
Ключевые слова: характеризация дифракционных оптических элементов, погрешность волнового фронта, контроль глубины травления, зеркальная сканирующая рефлектометрия, контроль дифракционной эффективности.

Цитирование: Полещук, А.Г. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.Н. Хомутов, А.С. Конченко // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 818-829. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.

Введение

Во многих высокотехнологичных отраслях промышленности находят широкое применение оптические элементы, имеющие гладкий, кусочно-непрерывный или ступенчатый поверхностный микрорельеф с глубиной до нескольких микрометров. Типичные формы и параметры рельефа представлены в табл. 1.

Табл. 1

Тип структуры	Вид структуры	Характерные параметры
Бинарная амплитудная структура		Минимальный период: $T \sim (1,5 - 2)\lambda$. Пропускание: $t = (2 - 3)D$.
Бинарный (фазовый) микрорельеф		Минимальный период: $T \sim (1,5 - 2)\lambda$. Высота рельефа: $H = \lambda/2(n - 1)$.
Кусочно-непрерывный микрорельеф (киноформ)		Минимальный период: $T \sim (3 - 5)\lambda$. Высота рельефа: $H = m\lambda/(n - 1)$.
Многоуровневый микрорельеф		Минимальный пиксел: $P \sim (1 - 3)\lambda$. Высота рельефа: $H = \lambda/(n - 1)$.
Непрерывный дифракционный микрорельеф		Минимальный период: $T \sim 10\lambda$. Высота рельефа: $H = \lambda/(n - 1)$.
Непрерывный микрорельеф конформального элемента		Пространственные частоты $< 1 \text{ мм}^{-1}$. Высота рельефа: $H = (1 - 10)\lambda/(n - 1)$.

Развитие специализированных неразрушающих методов контроля оптических элементов с микрорельефом принципиально важно для освоения производства дифракционных, микрооптических и конформальных [1] элементов в связи с тем, что работа оптического элемента оценивается не только по соответствию за-

данному преобразованию световой волны, но и по соответствию жестким критериям его энергетической эффективности и малому светорассеянию.

В лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН разработано и введено в практику несколько различных подходов к характеризации разнообразных типов оптических элементов с микрорельефом на промежуточных и финальной стадии их изготовления. Целью настоящей работы является обзор некоторых разработанных методов в соответствии с типами контролируемых микроструктур, начиная от бинарных фазовых синтезированных голограмм и кончая кусочно-непрерывными дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) и конформальными элементами с непрерывным микрорельефом.

Методы и подходы к характеризации ДОЭ

Оптимальным способом интегральной оценки ДОЭ является измерение энергетической эффективности оптического элемента и параметров формируемого им волнового фронта как конечных характеристик, задаваемых при расчете. При этом необходимо производить измерение дифракционной эффективности (ДЭ) и формы волнового фронта в рабочем дифракционном порядке (ДП) на расчетной длине волны. Но на промежуточных этапах изготовления рельеф ДОЭ может быть сформирован на материале (например, в фоторезисте) с показателем преломления, отличающимся от материала конечного оптического элемента, а при использовании технологии «сухого» травления коэффициент переноса микрорельефа в подложку часто существенно отличается от единицы. Таким образом, глубина микрорельефа на промежуточном этапе будет не оптимальна для контроля на расчетной длине волны. В некоторых случаях невозможно измерить ДЭ отдельного ДОЭ и параметры формируемого им волнового фронта, пока не собрана вся оптическая схема. Поэтому наиболее часто на этапе

первичного формообразования используется прямое измерение формы и топологии микрорельефа локально или всего элемента (при малых размерах) с помощью профилометра.

Обычно при таком контроле для того чтобы не создавать специальных подходов к каждому типу многообразных форм микрорельефа и топологии ДОЭ, измеряется не сама рабочая структура ДОЭ, а однотипные тестовые структуры [2]. При производстве бинарных фазовых ДОЭ промежуточным этапом является маска, сформированная в пленке хрома, нанесенной на оптическую подложку. Наиболее простым объектом для контроля в этом случае являются фрагменты решеток с постоянным или слабо переменным периодом и скважностью, равной 2 (отношение периода к ширине части периода, покрытой хромом). При этом обычно контролируется скважность решетки и глубина рельефа после переноса топологии из маски в оптическую подложку. Однако в случае производства высокоточных синтезированных голограмм, предназначенных для контроля асферических поверхностей, важную информацию может дать также положение тестовой решетки по отношению к окружающей дифракционной структуре.

Дифракционные решетки с кусочно-непрерывным рельефом являются оптимальным выбором для контроля многоуровневых ДОЭ, так как позволяют характеризовать точность формирования заданной формы пологой части и обратные скаты микрорельефа дифракционных зон. Контроль многоуровневого рельефа – более сложная задача, чем контроль бинарных дифракционных элементов. В настоящее время программное обеспечение промышленно выпускаемых профилометров не имеет функций математической обработки, предназначенных для многоуровневых ДОЭ. Дело в том, что форма микрорельефа ДОЭ коренным образом отличается от типовых форм микрорельефов электронной промышленности и прецизионной механообработки, являющихся основными потребителями профилометров. Поэтому в стандартных профилометрах можно только получить профилограмму микрорельефа, но ее количественный анализ, соответствующий области применения, может быть сделан внешним программным обеспечением. В идеале, этот количественный анализ должен дать краткую численную характеристику микрорельефа, выраженную двумя-тремя значениями, чтобы облегчить оперативную оценку элемента.

Современные методы изготовления ДОЭ (прямая лазерная запись [3], полутонная литография [4], электронно-лучевая литография [5], алмазное точение [6]) обеспечивают точность выполнения размеров микроструктуры порядка 50 нм, что для ширины зон порядка 10–50 мкм соответствует ошибке фазовой функции $\lambda/1000 - \lambda/200$. Ошибки же глубины микрорельефа обычно составляют ~30–100 нм, что соответствует ошибке фазовой функции 0,03–0,1 λ . Очевидно, что основной вклад в ошибку кодированной фазовой функции вносит ошибка локальной глу-

бины микрорельефа. При точных горизонтальных размерах высота перепада микрорельефа на границе между зонами является естественным общим параметром, которым можно характеризовать точность выполнения микроструктуры по всей площади ДОЭ. Однако на практике перепад высоты микрорельефа на границе зон сглаживается в процессе изготовления. Кроме этого, аппаратная функция профилометра также вносит искажения в профилограмму обратного ската. К примеру, оптические профилометры просто не могут корректно измерять резкие скачки микрорельефа, так как отражение от крутого обратного ската и дифракция на границе приводят к тому, что свет не попадает обратно в объектив профилометра. Поэтому необходим метод оценки микрорельефа ДОЭ, который бы давал оценку его геометрических параметров независимо от типа профилометра.

Контроль характеристик ДОЭ с бинарным рельефом

ДОЭ с бинарным рельефом нашли широкое практическое применение в оптических интерферометрических системах для измерения формы поверхности асферической оптики. Точность изготовления ДОЭ сказывается на точности и достоверности результатов измерения. ДОЭ – корректоры волнового фронта для контроля и аттестации волновых фронтов главных зеркал современных телескопов должны иметь точность выполнения дифракционной структуры не хуже 10–25 нм и минимальный период менее 1 мкм при общих размерах в несколько сотен миллиметров [7]. Это позволит обеспечить отступление формы волнового фронта от расчетного не больше, чем $\lambda/20$ при угловых апертурах порядка 0,5. Это очень жесткое требование. ДОЭ такого типа могут быть изготовлены только с помощью устройств, использующих для записи полярную систему координат. Примером такого устройства является прецизионная круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) типа CLWS-300 [8], разработанная в ИАиЭ СО РАН и КТИ НП СО РАН и в настоящее время используемая во многих организациях как в России, так и за рубежом [9–12].

При записи в полярных координатах подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью, в то время как записывающий пучок перемещается вдоль прямой линии, пересекающей центр вращения. При спиральном сканировании, реализуемом с помощью медленного непрерывного перемещения записывающего пучка, ДОЭ изготавливается как одно целое с помощью единственной линии сканирования без остановок и возвратов. Это позволяет значительно уменьшить время записи, а также избежать сшивок, типичных для X-Y устройств. Круговое сканирование, оптимальное для записи осесимметричных ДОЭ, реализуется методом дискретного перемещения записывающего пучка. Применение кругового и спирального сканирования при переходе от полярной системы координат к цилиндрической позволяет записы-

вать произвольные ДОЭ не только на плоских поверхностях, но и на поверхностях вращения.

Погрешность волнового фронта

Смещение записанной зоны ДОЭ относительно ее расчетного положения обычно называется искажением структуры. Структура ДОЭ представляет собой набор элементарных ячеек (точек) с адресацией в полярной системе координат. Ячейки образуют картину полос или зон, подобных интерферограммам. Адрес записи произвольной ячейки i в полярной системе координат определяется как $P_i(r_i, \varphi_i) = [\zeta_{in} + \zeta_{out}] / 2$, где r_i – радиус записи (расстояние от оси вращения шпинделя до центра лазерного записывающего пятна), φ_i – угловая координата записи (определяется как разность между началом угловой координаты ($\varphi = 0$) и текущим угловым положением вращающегося стола), ζ_{in} и ζ_{out} – положения внутренней и внешней границы зоны ДОЭ.

Процесс записи вносит погрешности в структуру ДОЭ [13 – 15]. Эти погрешности имеют две составляющие:

- 1) конечное расстояние между расчетной $P_i(r_i, \varphi_i)$ и записанной $P_i'(r_i', \varphi_i')$ координатами точек, следовательно, $\epsilon_i = P_i(r_i, \varphi_i) - P_i'(r_i', \varphi_i')$ – погрешность координаты записи;
- 2) разница между расчетным и реально записанным размером и формой элементарной ячейки (погрешность размера).

Абсолютная погрешность координаты ϵ_i зависит от точности перемещения лазерного пучка относительно подложки. Эта погрешность после записи приводит к появлению дополнительного сдвига фазы волнового фронта, прошедшего через ДОЭ. Фазовый сдвиг аналогичен сдвигу фазы, обусловленному нарушением периодичности штрихов в обычной дифракционной решетке и вызывающему появление паразитных ДП, называемых «духами». Фазовый сдвиг (в долях длины волны света λ) может быть определен как

$$W = m\lambda(\epsilon_i/T), \tag{1}$$

где m – номер ДП; T – период дифракционной структуры в данной области ДОЭ; ϵ_i – погрешность координаты записи (область с координатами r_i, φ_i) в направлении, перпендикулярном полосам ДОЭ.

Ошибка фазы волнового фронта, обусловленная искажением структуры ДОЭ, пропорциональна номеру ДП и обратно пропорциональна локальному периоду штрихов решетки. Кроме того, эти искажения не сказываются на дифрагированном пучке нулевого порядка. Величина ошибки размера записываемой точки определяется условиями записи (величиной экспозиции, пространственным разрешением светочувствительного материала и др.) и практически не зависит от системы координат, которая используется для записи.

Контроль собственных погрешностей установки записи ДОЭ

Концентрические кольца и дуги являются идеальными структурами для записи в полярной системе ко-

ординат, в то время как для прямоугольной системы – это прямые линии и прямоугольники. Такие структуры записываются без ошибок дискретизации. В произвольном случае границы зон дифракционного элемента – сложные геометрические фигуры, которые искажаются одинаково в обеих системах координат. Поэтому для оценки точности изготовления ДОЭ в полярной системе координат необходимо рассмотреть два типа тестовых дифракционных структур: круговые зонные пластинки (набор концентрических колец) и линейные дифракционные решетки (ДР) (набор прямых линий). Интерферометр Физо с фазовым сдвигом позволяет контролировать форму плоского или сферического волновых фронтов с погрешностью порядка $\lambda / 1000$. Следовательно, измеряя локальную величину фазового сдвига, можно определять погрешность искажения дифракционных структур.

Круговые отражающие зонные пластинки (ЗП) наиболее подходят для проверки погрешностей радиальной координаты и фиксации начала координат. Погрешности угловой координаты не влияют на волновой фронт ЗП. Анализ волновых фронтов, отраженных от ДР, позволяет проверить все остальные погрешности.

На рис. 1 показаны схемы измерения волновых фронтов при помощи интерферометра Физо (например, ФТИ-100 [16]). Для измерения волнового фронта отражающей ЗП (рис. 1а) применяется дополнительный объектив. Схема Литрова (рис. 1б) используется для измерения формы волнового фронта линейной ДР. Интерференционная картина искажается, если во время записи возникли искажения дифракционных структур ЗП или ДР. Обработка интерференционной картины позволяет получить фазовую карту (рис. 2), по которой можно оценить величину этой ошибки и локализовать её.

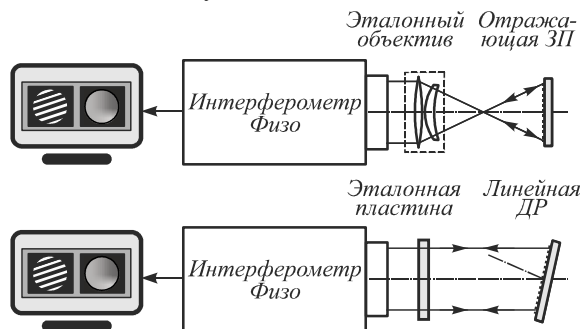


Рис. 1. Схемы измерения формы волновых фронтов при помощи интерферометра Физо

Данный подход позволяет не только оценить погрешности изготовления ДОЭ, но также даёт возможность выполнения аттестации и калибровки радиальной и угловой координат КЛЗС.

Контроль погрешности топологии дифракционных структур

При изготовлении ДОЭ с помощью КЛЗС искажения волнового фронта часто возникают из-за погрешностей радиальной координаты записи и имеют две составляющие: ошибка фиксации начала координат и ошибка, вызванная дрейфом координаты во время записи.

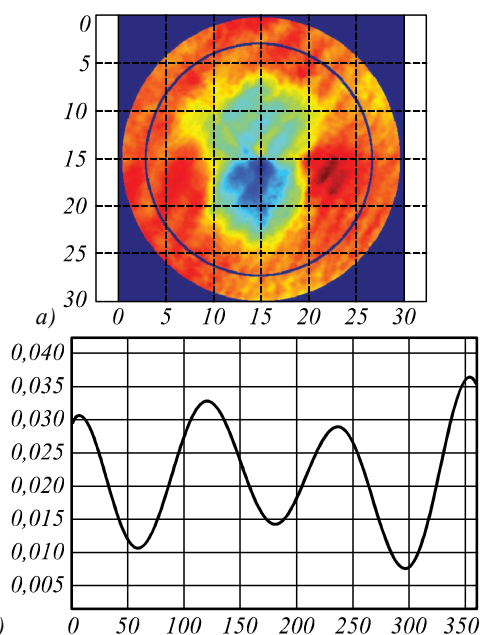


Рис. 2. Фазовая карта (а); профиль кругового сечения погрешностей волнового фронта (б)

Первая возникает из-за неправильного определения центра вращения шпинделя перед записью, а вторая возникает из-за температурного дрейфа системы и изменения окружающих условий (температура, влажность и давление воздуха) во время записи.

Если изготовленный ДОЭ формирует сферический волновой фронт, то проверка точности изготовления сводится к непосредственному измерению погрешности волнового фронта W с помощью интерферометра (рис. 1а). Однако если ДОЭ формирует асферический волновой фронт, такой контроль невозможен.

Для контроля точности изготовления ДОЭ с произвольной структурой был предложен метод, основанный на разделении процесса записи на два этапа [17]. На первом этапе записываются небольшие ($\sim 20 \times 20$ мкм) фрагменты структуры ДОЭ с шагом 1–2 мм. Время их записи составляет обычно десятки секунд, и, следовательно, можно пренебречь влиянием дрейфа. На втором этапе записывается весь ДОЭ, кроме тех мест, где уже были записаны фрагменты. На рис. 3 в качестве примера приведены микрофотографии двух участков (без ошибок (а) и с ошибкой (б)) записанной зонной пластинки с этими фрагментами.

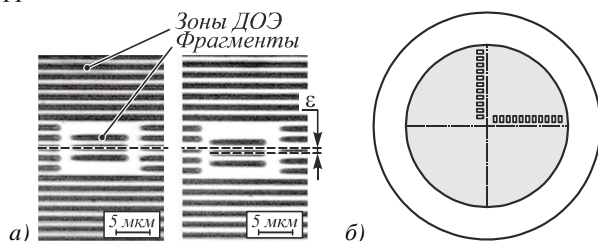


Рис. 3. Микрофотографии фрагментов амплитудного ДОЭ (хром на стекле), записанные без ошибки и с ошибкой позиционирования (а). Фрагменты тестовых ДОЭ (б)

Измерение под микроскопом локального сдвига зон позволяет определить величину ошибки позициониро-

вания на данном радиусе записи: $\epsilon \approx 0$ для (рис. 3а), и $\epsilon \approx 0,56 \mu\text{m}$ (рис. 3б). При $T = 1,4$ мкм это соответствует (1) погрешности волнового фронта $W = 0,4\lambda$. Фрагменты могут записываться в произвольных областях ДОЭ, но для удобства измерения они располагаются вдоль радиусов, образуя линейку (рис. 3б).

Контроль ДОЭ – корректоров волновых фронтов

Для формирования асферических волновых фронтов (АВФ) используются ДОЭ, которые преобразуют исходный волновой фронт в асферический, т. е. по своей сути являются корректорами волнового фронта. Дифракционные корректоры (ДК) широко применяются для интерферометрического контроля асферической оптики [18]. Однако обеспечение погрешности формирования АВФ менее $0,01\lambda$ является сложной проблемой. Одним из методов [19] контроля изготовления ДК является применение дифракционного имитатора (ДИ) и интерферометра Физо в качестве регистрирующего прибора (рис. 4а), которые образуют оптический компаратор.

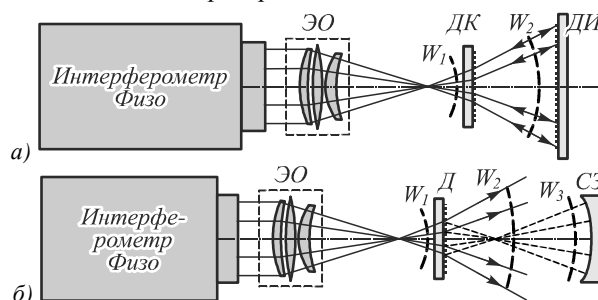


Рис. 4. Оптические схемы контроля изготовления ДК с помощью ДИ (а); СЗ (б)

Сферический волновой фронт W_1 от интерферометра Физо с эталонным объективом (ЭО) проходит ДК и преобразуется в АВФ W_2 . Последовательно с ДК устанавливается ДИ, от которого оптическое излучение отражается и дифрагирует строго назад, в интерферометр. Если ДК и ДИ рассчитаны и изготовлены без погрешностей, интерферометр не регистрирует искажения АВФ. Этот метод успешно применяется для контроля больших асферических зеркал [1]. Основными недостатками этого метода контроля является необходимость изготовления еще одного ДОЭ – ДИ, а также сложность в юстировке оптической схемы, из-за чего aberrации низких порядков могут быть не определены.

Другим решением проблемы контроля изготовления ДК является применение комбинированных ДОЭ, которые формируют нескольких независимых волновых фронтов. Впервые идея комбинированных ДОЭ была предложена авторами настоящей работы [20], а затем успешно развита другими авторами [21–24]. На рис. 4б показано возможное решение задачи контроля изготовления ДК, выполненного в виде комбинированного ДОЭ, который преобразует входной сферический волновой фронт W_1 в два других волновых фронта: асферический W_2 и сферический W_3 [25]. Волновой фронт W_3 является тестовым, и его интен-

сивность может быть небольшой. Установка высококачественного сферического зеркала (СЗ) для отражения этого волнового фронта позволит проверить распространение пучков в этой оптической системе, так как оно действует так же, как ДИ на рис. 4а.

Контроль глубины травления фазовых бинарных синтезированных голограмм

Детальный анализ карты глубины травления фазовых бинарных ДОО (БДОЭ), предназначенных для контроля асферической оптики (например, ДК), является важной задачей, так как эта погрешность непосредственно влияет на форму формируемого АВФ. ДК имеют достаточно большой размер (свыше 200 мм [1]) и широкий диапазон изменения периодов, от долей до сотен микрон, что практически исключает возможность оперативного анализа с использованием стандартных профилографов.

Авторами разработан вариант метода зеркальной спектроскопической рефлектометрии (ЗСР), основанный на спектральных свойствах отражательных бинарных фазовых решеток [26].

Интенсивность нулевого ДП является периодической функцией волнового числа света. Экстремумы интенсивности в спектре отраженного света в нулевом ДП будут наблюдаться при волновых числах падающего света ($k = 1/\lambda$), удовлетворяющих условию:

$$k \cdot n(k) = m \cdot \cos(\alpha) / 4H, \tag{2}$$

где m – целое число полуволн, укладывающихся в оптической разности хода. Глубина рельефа H определяется по формуле:

$$H = \frac{\cos \alpha}{4(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(k_i n_i - k_{i+1} n_{i+1})}, \tag{3}$$

где N – количество анализируемых экстремумов, n_i – коэффициент преломления при волновом числе k_i . Измерение на отражение позволяет увеличить диапазон разности фаз пучков, отраженных от выступов и выемок рельефа, по сравнению с работой на пропускание, и измерить более точно фазовые решетки небольшой глубины.

Диапазон применимости метода определяется спектральным диапазоном спектрометра, его точностью определения длины волны и необходимой точностью измерения глубины. Минимальная и максимальная глубина рельефа может быть вычислена по следующим формулам:

$$H_{\min} = \frac{L}{4n} \text{ceil} \left(\frac{\lambda_{\min}}{L} \right) \cdot \text{ceil} \left(\frac{\lambda_{\min}}{L} + 1 \right), \tag{4}$$

$$H_{\max} \approx \frac{\lambda_{\max}^2}{16 \cdot n \cdot L} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{6L}{\lambda_{\max}}} \right), \tag{5}$$

где $\text{ceil}(x)$ – функция округления аргумента x до большего целого числа, λ_{\min} и λ_{\max} – границы спектрального диапазона спектрометра, а $L = 100 \cdot \Delta\lambda / \delta$ – минимальная разность длин волн между соседними экстремумами, которую можно определить с требуемой точностью $\delta\%$ при помощи спектрометра

с ошибкой длины волны $\Delta\lambda$. Если ошибка определения длины волны $\Delta\lambda = 0,8$ нм и спектральный диапазон 200–1150 нм, то можно достигнуть точности $\delta = 1\%$ для глубин от 240 до 3200 нм, проводя измерения со стороны структуры и от 165 до 2200 нм для измерений с обратной стороны подложки.

Погрешность измерений [27] в основном определяется сдвигами максимумов спектра, которые произошли из-за наклона канавок боковых стенок, неопределенностью определения угла падения света и ошибкой определения длины волны света спектрофотометром. Теоретически и экспериментально показано, что метод может обеспечить погрешность 0,25–1% для настольных спектрофотометров. Однако малогабаритные волоконные спектрометры более удобны для сканирующих измерений БДОЭ большой площади. Экспериментальная установка для определения характеристик БДОЭ была разработана с использованием волоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048*16-UA-50 (спектральный диапазон 200–1150 нм) и источника света AvaLight-DH-S-DUV и включала в себя систему сканирования по площади образца размером до 200 × 200 мм с разрешением 1 мкм.

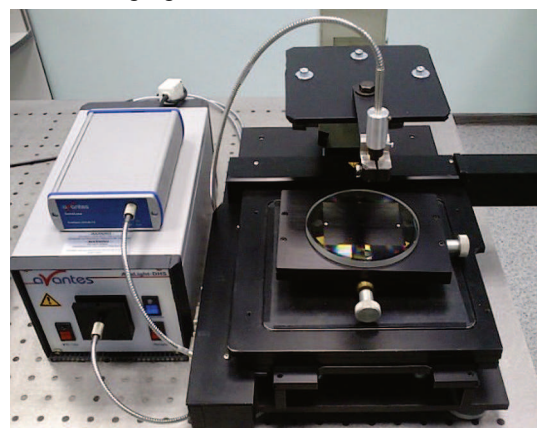


Рис. 5. Экспериментальная установка для измерения глубины травления

В качестве примера на рис. 6 показана карта глубин рельефа БДОЭ диаметром 75 мм, минимальным периодом структуры 3 мкм.

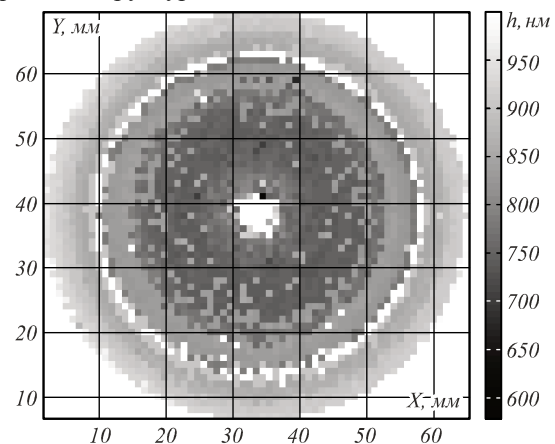


Рис. 6. Карта глубин травления БДОЭ

Средняя глубина рельефа ДОО составила 790 нм со стандартным отклонением 66,9 нм, а измерение всей карты глубин заняло около 17 мин. В центре данные потеряны из-за малых углов расхождения ДП при отражении от структуры с большим периодом.

Контроль характеристик элементов с непрерывным и многоуровневым рельефом

Метод аппроксимированной глубины для многоуровневого микрорельефа

Для оперативной оценки точности изготовления многоуровневого дифракционного микрорельефа разработан метод, позволяющий определить из профилометрических данных глубину микрорельефа и отклонение его формы от заданной, независимо от типа профилометра. В качестве такого критерия предложено использовать параметр «аппроксимированная глубина» [28]. Метод определения этой величины показан на рис. 7.

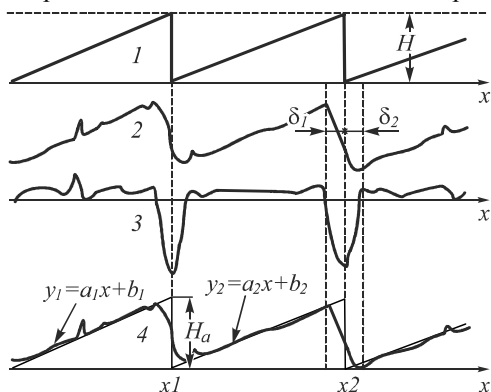


Рис. 7. Этапы обработки рельефа для определения аппроксимированной глубины

Расчетный микрорельеф 1, сформированный каким-либо методом на поверхности пленки или подложки, отображается профилометром в виде графика 2. Следующий график 3, полученный фильтрацией высокочастотных шумов и дифференцированием профилограммы, позволяет определить границы дифракционных зон. Данные о глубине микрорельефа на расстояниях δ_1 и δ_2 от границ зон являются ненадежными. Поэтому для аппроксимации используются данные вне этих участков (кривая 4). Линейная аппроксимирующая функция $y = ax + b$ находится для каждой зоны отдельно. Затем эта функция экстраполируется до найденных границ зоны. Перепад высоты экстраполированной функции $ax_1 - ax_2$ в пределах границ одной зоны и дает искомую величину – аппроксимированную глубину. Очевидно, что при плохом горизонтальном выравнивании профилограммы этот метод дает значительную ошибку. Если профилограмма покрывает хотя бы две дифракционные зоны, аппроксимированная глубина может быть определена более точно другим путем – как разность значений функции $y_1(x_1) - y_2(x_1)$ на данной границе зоны. У этого подхода есть еще одно преимущество – он не зависит от точности определения границ дифракционной зоны, что существенно повышает точность измерений. Угол наклона базовой поверхности ДОО по отношению к направляющим системы сканирования профилометра

вносит ошибку, равную $H_a(1 - \cos\alpha)$, что изменяет аппроксимированную глубину не более чем на 1% при угле наклона до 8° .

Линейная аппроксимация в описанном выше методе может быть заменена на нелинейную в случае технологических нелинейностей или нелинейной расчетной формы микрорельефа. Таким образом, графическая форма представления данных, сложная для оперативной оценки микрорельефа, может быть сведена к двум количественным величинам: аппроксимированной глубине и ошибке отклонения от заданного вида нелинейности, использованного при аппроксимации.

Контроль многоуровневых ДОО для ДУФ-диапазона

При мелкосерийном заказном производстве многоуровневых ДОО (МДОЭ) для ДУФ-диапазона существенной проблемой является контроль ДЭ готовых изделий, а также наличие паразитного рассеяния света. Это связано с тем, что измерения необходимо проводить в соответствии с расчетной оптической схемой, не раскрываемой, как правило, заказчиком и на расчетной длине волны ДУФ-лазера, доступ к которому для изготовителя ДОО затруднен. Для решения этой проблемы предложен метод на основе анализа тестовых линейных решеток с такой же глубиной рельефа, что и у МДОЭ и конфигурации измерения на отражение с лазерным источником освещения, имеющим длину волны, равную удвоенной глубине микрорельефа с учетом наклонной геометрии падения пучка. На рис. 8 показана упрощенная оптическая схема измерительной установки.

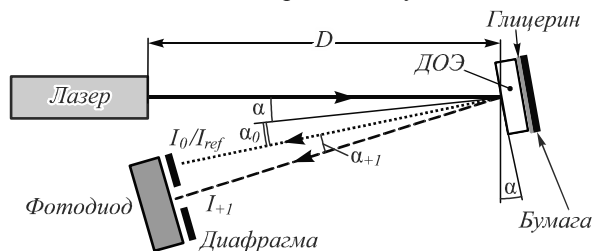


Рис. 8. Упрощенная схема установки для измерения ДЭ на отражение

Для предотвращения интерференции с пучком, отраженным от обратной стороны подложки, на нее может наноситься слой глицерина и копировальная бумага с матовой поверхностью, но существенно более стабильные результаты получаются при напылении непрозрачной металлической пленки на рельеф. Пленка стравливается после измерений. Угол падения светового пучка на подложку α является подгоночным параметром и выбирается так, чтобы соблюдалось равенство

$$H_p = \lambda \cos(\alpha)/2, \quad H_p = \lambda \cdot \cos(\alpha)/2 \tag{6}$$

где H_p – расчетная глубина рельефа МДОЭ. Подстройка угла необходима в связи с тем, что лазерные модули могут иметь длину волн из небольшого стандартного ряда широкого применения.

МДОЭ, для тестирования которых разрабатывался данный метод, изготавливались методом проекционной фотолитографии с растрованным фотошаблоном [29]. На кварцевой подложке диаметром 100 мм

печатались 20 ДОЭ с двумя тестовыми линейными решетками каждая. Период решеток составил 100 мкм. Расчетная глубина рельефа была равна 344 нм. Для измерений использовался лазерный модуль с длиной волны 691 нм.

По результатам измерений 40 МДОЭ средняя ДЭ в первом порядке составила 91,4% при максимальном значении 94,5% и минимальном 88%. Такой разброс ДЭ был связан с плановой вариацией дозы экспозиции при проекционной печати. Средняя ДЭ нулевого порядка составила 1,6%.

Проверка стабильности результатов измерений по 20 измерениям одной и той же тестовой решетки показала, что среднеквадратичное отклонение не превышает 0,5%.

Контроль конформальных элементов

Конформальные корректоры (КК) используются, в частности, для компенсации искажений волнового фронта светового пучка, проходящего через широкоапертурные монокристаллические стержни из YAG:Nd3+, которые применяются в мощных твердотельных лазерах в качестве активных элементов [1]. Рельеф КК для коррекции aberrаций формируется на первой стадии в фоторезисте с помощью полутоновой растровой фотолитографии. Затем рельеф переносится на поверхность кварцевой подложки с помощью реактивного ионного травления. Для контроля рельефа в фоторезисте предложено использовать метод зеркальной спектроскопической рефлектометрии (ЗСР), суть которого изложена ранее в параграфе по контролю глубины травления фазовых бинарных синтезированных голограмм. При отражении от слоя фоторезиста так же, как и от бинарной фазовой решетки, возникает двухлучевая интерференция между лучами, отраженными от поверхности фоторезиста и подложки. Таким образом, в спектре отражения возникают такие же экстремумы, положение которых в спектре зависит от толщины слоя.

Особенность применения ЗСР к измерению толщины фоторезиста в том, что спектральная зависимость коэффициента преломления фоторезиста в измеряемом слое может быть различной в зависимости от партии, времени хранения и условий его обработки. Поэтому к основным источникам погрешностей, добавляется ошибка в определении коэффициента преломления фоторезиста для каждого экстремума.

Для того, чтобы установка, реализующая метод ЗСР, стала универсальной, то есть пригодной для измерения как ДОЭ, так и КК, она была модернизирована. Оптическая схема установки, показанная на рис. 9а, включает три зеркальных объектива со следующими параметрами: увеличение 15x, апертура – 0,28, рабочий отрезок 24,5 мм. Выбор зеркальных объективов обусловлен отсутствием у них хроматических aberrаций. Пучок от осветителя до измеряемой поверхности проходит с одной стороны от оси объектива, а отраженный – с другой. Таким образом, эффективная апертура пучков снижается примерно в 3 раза. При одностороннем прохождении пучков через объективы с

апертурой 0,28 вариация углов падения лучей на исследуемую поверхность приводит к увеличению погрешности измерения не более чем на ±2,5%.

Использование трех объективов и частичного заполнения апертуры обусловлено необходимостью фильтрации ДП, отличных от нулевого, при контроле ДОЭ, так как в этом случае на спектрометр должен поступать только отраженный пучок в нулевом ДП. Оптическая система переносит изображение торца волокна 1:1 на исследуемую поверхность и затем на торец волокна спектрометра. Эта схема позволяет управлять дискретно пространственным разрешением прибора путем замены оптических волокон на волокна с другим диаметром сердцевины. Испытания прибора проведены с использованием волокна с диаметром сердцевины 100 мкм. На рис. 9б представлен профиль распределения толщины фоторезиста измеренного конформального оптического элемента диаметром 20 мм. Сканирование проведено с шагом 100 мкм при диаметре 100 мкм пятна сфокусированного пучка от осветителя. На краях элемента заметны искаженные результаты измерений, которые связаны с тем, что часть сканирующего пучка вышла за край подложки.

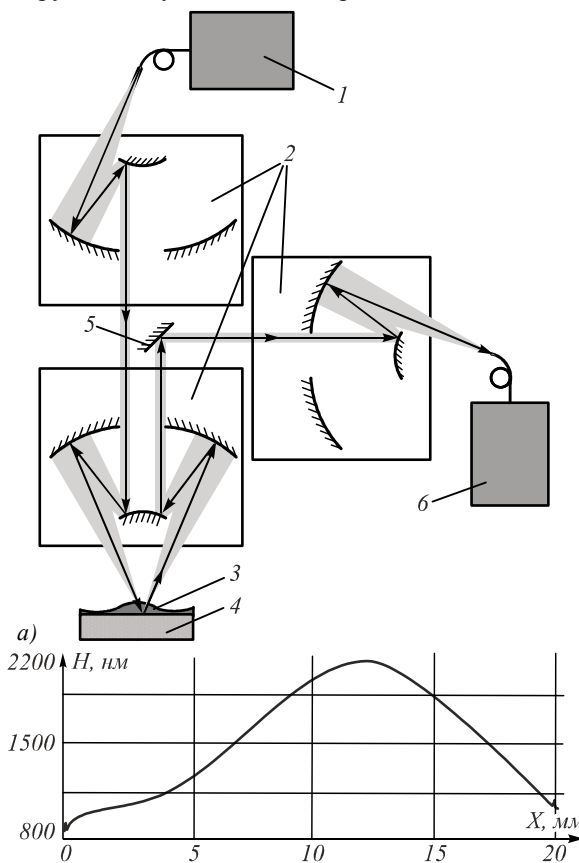


Рис. 9. Модернизированная оптическая схема установки. 1 – волоконный источник света, 2 – зеркальные объективы, 3 – слой фоторезиста, 4 – кварцевая подложка, 5 – поворотное зеркало, 6 – волоконный спектрометр (а). Измеренный профиль распределения толщины фоторезиста (б)

Аналогичные бесконтактные измерения с высокой производительностью невозможны при использова-

нии обычных оптических профилометров. Выбранный метод измерения практически независим от неплоскостности подложки, на которой нанесен фоторезист. Это обстоятельство дает существенное преимущество перед интерферометрией, используемой для контроля микрорельефа КК, сформированного на поверхности кварцевой подложки.

Контроль дифракционной эффективности ДОЭ

Одной из важнейших характеристик ДОЭ является дифракционная эффективность. Для точного контроля ДЭ по многим ДП разработан автоматизированный стенд [11], схема которого приведена на рис. 10а.

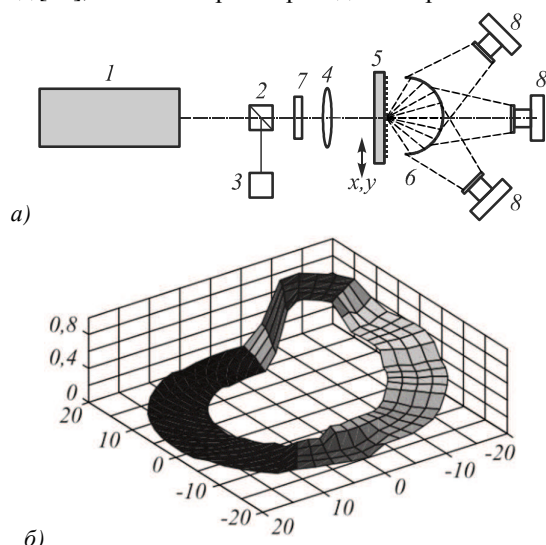


Рис. 10. Оптическая схема стенда для измерения ДЭ ДОЭ (а) и пример карты распределения ДЭ (б)

Принцип работы: излучение от лазера 1 фокусируется объективом 4 на поверхность исследуемого ДОЭ 5, образуя световое пятно S_i небольшого размера. Дифрагированное на структуре ДОЭ излучение попадает на матовый экран сферической формы 6, изображение с которого регистрируется несколькими видеокамерами 8. Использование матового сферического экрана и нескольких видеокамер позволяет расширить диапазон регистрируемых углов дифракции ДП. Сканирование поверхности происходит за счёт перемещения ДОЭ относительно лазерного пучка. Перемещение осуществляется с помощью двухкоординатного устройства позиционирования по заданной траектории с заданным шагом. В каждой точке траектории камера осуществляет захват и передачу изображения управляющему компьютеру, который производит анализ изображений, рассчитывает значения ДЭ для каждой ДП каждой точки траектории и представляет результаты в виде карты распределения ДЭ рис. 10б.

Часть сканирующего излучения с помощью светоделителя 2 направляется к фотоприёмнику 3, сигнал которого оцифровывается и передаётся управляющему компьютеру. Это необходимо для обеспечения контроля флуктуации мощности лазерного модуля. Фазовая пластинка 7 при необходимости вводится для вра-

щения плоскости поляризации, когда необходимо исследовать влияние поляризации излучения на ДЭ ДОЭ.

Сканирующий метод является специфическим бесконтактным методом для контроля ДЭ ДОЭ. Он позволяет оперативно оценивать качество изготовления ДЭ и выявлять огрехи технологического процесса. Этот метод является базовым для определения таких параметров ДОЭ, как глубина рельефа, угол поворота и период структуры [12]. Полученные карты распределения ДЭ могут подвергаться дальнейшему анализу и компьютерной обработке с целью расчёта этих параметров.

Заключение

В лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН разработано несколько различных подходов к характеристике разнообразных типов оптических элементов с микрорельефом на промежуточных и финальной стадии их изготовления. В табл. 2 дана классификация этих методов с точки зрения областей применения.

Для задач профилометрии кусочно-непрерывных ДОЭ предложен метод аппроксимированной глубины, позволяющий повысить надёжность оперативной характеристики высокоэффективных ДОЭ и снизить влияние на нее типа профилометра. В зависимости от объема данных в профилограмме возможны однограничный или двухграничный варианты этого метода для пилообразного рельефа.

Для того чтобы сделать измерения менее зависимыми от топологии и величины локальных периодов измеряемых элементов большой площади, удобно использовать для профилометрии тестовые структуры малого размера типа многоуровневых или бинарных линейных ДР, в том числе встроенных в световую апертуру элемента.

Для контроля глубины травления бинарных фазовых ДОЭ, а также измерения толщины слоя фоторезиста в процессе изготовления КК использован метод зеркальной спектроскопической рефлектометрии, основанный на измерении спектра излучения, зеркально отраженного от дифракционной структуры. Ранее разновидности этого метода использовались для контроля тестовых периодических структур при производстве интегральных микросхем [30], толщины тонких пленок [31], а также восстановления профиля дифракционных решеток [32]. Для реализации метода зеркальной спектроскопической рефлектометрии создана сканирующая установка с применением волоконного спектрометра и осветителя. Установка позволяет измерять характеристики элементов размером до 200×200 мм с погрешностью от $\pm 1\%$ до $\pm 2,5\%$ для элементов с глубиной травления от 165 до 3200 нм.

Использование тестовых структур для контроля качества ДОЭ [2] позволяет эффективно оценивать ошибки, возникшие при записи. При контроле тестовых структур с помощью лазерного интерферометра появляется возможность не только производить оценку качества ДОЭ, но также и осуществлять изме-

рение собственных погрешностей записывающей установки. Интерферометрический метод, основанный на анализе фазовой карты тестовых структур, содержащих линейные ДР, позволяет обнаружить отклонения в работе угловой координаты КЛЗС до 1 угл. сек. В отличие от известного метода измерения угловых шкал [33] он не требует уникального углоизмерительного оборудования.

Табл. 2

Метод	Типы контролируемых элементов
Профилометрия	Кусочно-непрерывные и бинарные ДОО, тестовые структуры для всех типов элементов
Спектроскопическая рефлектометрия	Бинарные ДОО и конформальные корректоры на промежуточном этапе рельефа в фотолитографии
Дифрактометрия	Все типы ДОО
Интерферометрия	ДОО для контроля асферики

Измерение ДЭ – типовая проблема дифракционной оптики. Известны работы, в которых описываются сканирующие методы измерения ДЭ [34, 35]. Однако для ряда задач более эффективно измерять распределение ДЭ по всей площади ДОО описанным сканирующим методом [36]. Он позволяет измерять распределение интенсивности по дифракционным максимумам, оценивать эффективность в локальных точках, производить измерения по заданной траектории без участия оператора. Описанный метод обеспечивает высокую точность 1–3% в зависимости от типа ДОО.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность всему коллективу лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН за помощь в проведении экспериментов и изготовлении ДОО.

Данная работа частично поддержана грантом РФФИ ОФИ-М № 14-29-07227 и междисциплинарными интеграционными проектами № 43 и 112 СО РАН. В работе частично использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» ИАиЭ СО РАН, а также аналитико-технологического инновационного центра «Высокие технологии и новые материалы» НГУ.

Литература

1. **Корольков, В.П.** Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах YAG: ND Nd³⁺ / В.П. Корольков, Р.К. Насыров, А.Г. Полещук, Ю.Д. Арапов, А.Ф. Иванов // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 2. – С. 117-121. – DOI: 10.1070/QE2013v043n02ABEH015034.
2. **Волков, А.В.** Контроль параметров микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием тестовых дифракционных структур / А.В. Волков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2001. – №. 12. – С. 179-185. – DOI: 10.14498/vsgtu80.
3. **Gale, M.T.** Fabrication of kinoform structures for optical computing / M.T. Gale, G.K. Lang, J.M. Raynor, H. Schütz,

- D. Prongué // Applied Optics. – 1992. – Vol. 31, Issue 26. – P. 5712-5715. – DOI: 10.1364/AO.31.005712.
4. **Korolkov, V.P.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOE's / V.P. Korolkov, A.I. Malyshev, V.G. Nikitin, V.V. Cherkashin, A.G. Poleshchuk, A.A. Kharisov // Proceedings of SPIE. – 1999. – Vol. 3633. – P. 129-138. – DOI: 10.1117/12.349316.
5. **Kley, E.B.** Continuous profile writing by electron and optical lithography / E.B. Kley // Microelectronic Engineering. – 1997. – Vol. 34, Issues 3-4. – P. 261-298. – DOI: 10.1016/S0167-9317(97)00186-X.
6. **Blough, C.G.** Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements / C.G. Blough, M. Rossi, S.K. Mack, R.L. Michaels // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36, Issue 20. – P. 4648-4654. – DOI: 10.1364/AO.36.004648.
7. **Абдулкадыров, М.** Современные способы изготовления астрономических и космических зеркал / М. Абдулкадыров, А. Семенов // Фотоника. – 2015. – № 3. – С. 62-79.
8. **Poleshchuk, A.G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.A. Kharisov, V.A. Cherkashin, V.P. Kirianov, A.V. Kirianov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglad // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38(8). – P. 1295-1301. – DOI: 10.1364/AO.38.001295.
9. **Wang, D.S.** Fabrication technology of the centrosymmetric continuous relief diffractive optical elements / D.S. Wang, C.T. Luo, T. Chen, Y.Q. Xiong, H.K. Liu, Z.Y. Ye // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 18. – P. 95-99. – DOI: 10.1016/j.phpro.2011.06.065.
10. **Pruss, C.** Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry / C. Pruss, S. Reichelt, H.J. Tiziani, V.P. Korolkov // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4900. – P. 873-884. – DOI: 10.1117/12.484473.
11. **Волков, А.В.** Высокоразрешающая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 220-225.
12. **Абрамов, Ю.Ф.** Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе новейших лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий / Ю.Ф. Абрамов, В.П. Кирьянов, А.В. Кирьянов, С.А. Кокарев, Д.Ю. Кручинин, Ю.В. Чугуй, О.Б. Яковлев // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 8. – С. 61-65.
13. **Коронкевич, В.П.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат - анализ погрешностей изготовления и их измерение / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // Автометрия. – 1997. – № 6. – С. 42-56.
14. **Коронкевич, В.П.** Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 1997. – Вып. 17. – С. 63-74.
15. **Poleshchuk, A.G.** Accuracy potential of circular laser writing of DOE's / A.G. Poleshchuk, V.V. Cherkashin, A.A. Kharisov, V.P. Korolkov, V.P. Koronkevich // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3348. – P. 58-68. – DOI: 10.1117/12.302509.
16. **Полещук, А.Г.** Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей / А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов, А.Е. Маточкин, Р.К. Насыров, В.В. Черкашин // Фотоника. – 2016. – № 4. – С. 38-51.
17. **Полещук, А.Г.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов /

- А.Г. Полещук, В.П. Корольков, В.В. Черкашин, С. Райхельт, Дж. Бёдж // *Автометрия*. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 3-19.
18. **Полещук, А.Г.** Лазерные методы контроля асферической оптики / А.Г. Полещук, А.Е. Маточкин // *Фотоника*. – 2011. – № 2. – С. 38-44.
 19. **Burge, J.H.** Null test optics for the MMT and Magellan 6.5-m $f/1.25$ primary mirrors / J.H. Burge, D.S. Anderson, D.A. Ketelsen, S.C. West // *Proceedings of SPIE*. – 1994. – Vol. 2199. – P. 658-669. - DOI: 10.1117/12.269063.
 20. **Poleshchuk, A.G.** Design and application of CGH for simultaneous generation several specified wavefronts / A.G. Poleshchuk, J.H. Burge, E.G. Churin // *EOS Topical Meeting on Diffractive Optics, Jena, Germany, 23-25 August 1999*. – Vol. 22. – P. 155-156.
 21. **Beyerlein, M.** Dual-wave-front computer-generated holograms for quasi-absolute testing of aspherics / M. Beyerlein, N. Lindlein, J. Schwider // *Applied optics*. – 2002. – Vol. 41(13). – P. 2440-2447. - DOI: 10.1364/AO.41.002440.
 22. **Reichelt, S.** Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms / S. Reichelt, C. Pruss, H.J. Tiziani // *Applied optics*. – 2003. – Vol. 42(22). – P. 4468-4479. - DOI: 10.1364/AO.42.004468.
 23. **Gao, G.** Dual-CGH interferometry test for x-ray mirror mandrels / G. Gao, J. Lehan, U. Griesmann // *Proceedings of SPIE*. – 2009. – Vol. 7389. – 73891B. – DOI: 10.1117/12.830659.
 24. **Ping, S.M.** Computer generated hologram null test of a freeform optical surface with rectangular aperture / S. Ping, M. Jianshe, T. Qiaofeng, K. Guoguo, L. Yi, J. Guofan // *Optical engineering*. – 2012. – Vol. 51(2). – 025801. - DOI: 10.1117/1.OE.51.2.025801.
 25. **Poleshchuk, A.G.** Aspherical wavefront shaping with combined computer generated holograms / A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov // *Optical engineering*. – 2013. – Vol. 52(9). – 091709. - DOI: 10.1117/1.OE.52.9.091709.
 26. **Корольков, В.П.** Спектрофотометрический метод измерения глубины отражательных калибровочных решеток / В.П. Корольков, А.С. Конченко // *Автометрия*. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 119-127.
 27. **Korolkov, V.P.** Etch depth mapping of phase binary computer-generated holograms by means of specular spectroscopic scatterometry / V.P. Korolkov, A.S. Konchenko, V.V. Cherkashin, N.G. Mironnikov, A.G. Poleshchuk // *Optical Engineering*. – 2013. – № 52(9). – 091722. - DOI: 10.1117/1.OE.52.9.091722.
 28. **Корольков, В.П.** Характеризация профилограмм кучечно-непрерывного дифракционного микрорельефа / В.П. Корольков, С.В. Остапенко // *Оптический журнал*. – 2009. – Т. 76, вып. 7. – С. 34-41.
 29. **Полещук, А.Г.** Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полупроводниковой и фоторастровой технологий / А.Г. Полещук // *Автометрия*. – 1991. – № 6. – С. 54-61.
 30. **Xinhui, N.J.** Specular Spectroscopic Scatterometry / N. Xinhui, J. Nickhil, B. Junwei, C.J. Spanos // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. – 2001. – № 14(2). – P. 97-111. - DOI: 10.1109/66.920722.
 31. **Piegari, A.** Thin film thickness measurement: a comparison of various techniques / A. Piegari, E. Masetti // *Thin solid films*. – 1985. – Vol 124(3-4). – P. 249-257. - DOI: 10.1016/0040-6090(85)90273-1.
 32. **Бабин, С.В.** Определение параметров профиля трапецидальной дифракционной решетки на основе полиномиальных аппроксимаций отраженного поля / С.В. Бабин, Л.Л. Досколович, И.И. Кадомин, Е.А. Кадомина, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 156-161.
 33. **Кручинин, Д.Ю.** Исследование угловых погрешностей круговых оптических шкал, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300 / Д.Ю. Кручинин, О.Б. Яковлев // *Оптический журнал*. – 2011. – Т. 78, вып. 6. – С. 47-50.
 34. **Кирьянов, В.П.** Измерение эффективности дифракционных оптических элементов методом сканирования / В.П. Кирьянов, В.Г. Никитин // *Автометрия*. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 82-93.
 35. **Cai, W.** Diffractive optics calibrator: measurement of etching variations for binary computer-generated holograms / W. Cai, P. Zhou, C. Zhao, J.H. Burge // *Applied optics*. – 2014. – Vol. 53(11). – P. 2477-2486. - DOI: 10.1364/AO.53.002477.
 36. **Хомутов, В.Н.** Измерение дифракционной эффективности ДОО по многим порядкам дифракции / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, В.В. Черкашин // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 196-202.

Сведения об авторах

Полещук Александр Григорьевич, 1950 года рождения, кандидат технических наук с 1980 года, доктор технических наук с 2003 года. Заведующий лабораторией дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. Область научных интересов: компьютерная оптика, лазерная интерферометрия, лазерные технологии. E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su.

Корольков Виктор Павлович, 1960 года рождения, в 1982 году окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. Кандидат технических наук с 2000 года. Доктор технических наук с 2014 года. Ведущий научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. E-mail: victork@iae.nsk.su.

Насыров Руслан Камильевич, 1982 года рождения, в 2005 году окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. В 2009 защитил кандидатскую диссертацию по техническим наукам. В настоящее время старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. E-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru.

Хомутов Владимир Николаевич, 1987 года рождения. В 2010 году окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Физика оптических явлений». Работает младшим научным сотрудником в лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. E-mail: v.n.homutov@gmail.com.

Конченко Александр Сергеевич, 1988 года рождения, в 2012 году окончил Новосибирский государственный университет – НГУ по специальности «Оптика». Аспирант ИАиЭ СО РАН. E-mail: as_konch@ngs.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 1 сентября 2016 г. Окончательный вариант – 11 декабря 2016 г.

METHODS FOR ON-LINE TESTING OF CHARACTERISTICS OF DIFFRACTIVE AND CONFORMAL OPTICAL ELEMENTS DURING THE MANUFACTURING PROCESS

A.G. Poleshchuk¹, V.P. Korolkov¹, R.K. Nasyrov¹, V.N. Khomutov¹, A.S. Konchenko¹

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract

Development of dedicated methods for nondestructive testing of microstructured optical elements is a prerequisite for the wide-scale manufacturing of diffractive, micro-optical and conformal elements. A variety of approaches to the characterization of diverse types of microstructured optical elements were developed at the laboratory of Diffractive Optics at IAE SB RAS. These methods are intended to test wavefront errors, etch depth and diffraction efficiency during and after the manufacturing of elements with binary and multi-level surface profile. The review of the developed techniques and measuring circuits given in the work takes into account specific features of the elements' parameters and application areas. Testing results for the manufactured elements are discussed.

Keywords: diffractive optical elements characterization, errors of wavefront, etch depth measurement, scanning mirror reflectometry, diffraction efficiency measurement.

Citation: Poleshchuk AG, Korolkov VP, Nasyrov RK, Khomutov VN, Konchenko AS. Methods for on-line testing of characteristics of diffractive and conformal optical elements during the manufacturing process. *Computer Optics* 2016; 40(6): 818-829. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.

Acknowledgements: Authors express a deep gratitude to all the staff of the laboratory of diffractive optics of IA&E for the help with the experiments and manufacture of DOE. The work was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), OFI-M grant No. 14-29-07227 and Interdisciplinary integration projects No. 43 and 113 SB RAS. In the work, we used some items of the equipment of the IAE SB RAS's Centre of Collective Use "High-resolution spectroscopy of gases and condensed matters" as well as of the NSU's Innovation Center "High Technology and New Materials".

References

- [1] Korolkov VP, Nasyrov RK, Poleshchuk AG, Arapov YD, Ivanov AF. Conformal optical elements for correcting wavefront distortions in YAG: Nd³⁺ active elements. *Quantum Electron* 2013; 43(2): 117-121. DOI: 10.1070/QE2013v043n02ABEH015034.
- [2] Volkov AV. Testing of surface profile parameters of diffractive optical elements using diffractive test structures [In Russian]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki* 2001; 12: 179-185. DOI: 10.14498/vsgtu80.
- [3] Gale MT, Lang GK, Raynor JM, Schütz H, Prongué D. Fabrication of kinoform structures for optical computing. *Appl Opt* 1992; 31(26): 5712-5715. DOI: 10.1364/AO.31.005712.
- [4] Korolkov VP, Malyshev AI, Nikitin VG, Cherkashin VV, Poleshchuk AG, Kharisov AA. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs. *Proc SPIE* 1999; 3633: 129-138. DOI: 10.1117/12.349316.
- [5] Kley E.B. Continuous profile writing by electron and optical lithography. *Microelectronic Engineering* 1997; 34(3-4): 261-298. DOI: 10.1016/S0167-9317(97)00186-X.
- [6] Blough CG, Rossi M, Mack SK, Michaels RL. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements. *Appl Opt* 1997; 36(20): 4848-4654. DOI: 10.1364/AO.36.004648.
- [7] Abdulkadyrov M, Semenov A. Modern ways for production of astronomical and space mirrors. *Photonics* 2015; 3: 62-79.
- [8] Poleshchuk AG, Churin EG, Koronkevich VP, Korolkov VP, Kharisov AA, Cherkashin VA, Kirianov VP, Kirianov AV, Kokarev SA, Verhoglad AG. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure. *Appl Opt* 1999; 38(8): 1295-1301. DOI: 10.1364/AO.38.001295.
- [9] Wang D, Chongtai L, Yuqing Xi, Tao C, Hongkai L, Jizhou W. Fabrication technology of the centrosymmetric continuous relief diffractive optical elements. *Physics Procedia* 2011; 18: 95-99. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.06.065.
- [10] Pruss C, Reichelt S, Tiziani HJ, Korolkov VP. Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry. *Proc SPIE* 2002; 4900: 873-884. DOI: 10.1117/12.484473.
- [11] Volkov AV, Moiseev OY, Poletaev SD. Precision laser recording on a molybdenum films for diffractive microrelief formation. *Computer Optics* 2013; 37(2): 220-225.
- [12] Abramov YuF, Kir'yanov VP, Kir'yanov AV, Kokarev SA, Kruchinin DYu, Chugui YuV, Yakovlev OB. Modernizing the optical divider production of the Ural Optomechanical Factory on the basis of up-to-date laser-computer and photolithographic technologies. *Journal of Optical Technology* 2006; 73(8): 544-547.
- [13] Koronkevich VP, Korolkov VP, Poleshchuk AG, Kharisov AA, Cherkashin VV. Synthesis of Diffractive Optical Elements in a Polar Coordinate System: Fabrication Errors and Their Measurement [In Russian]. *Avtometriya* 1997; 6: 42-56.
- [14] Koronkevich VP, Korolkov VP, Poleshchuk AG, Kharisov AA, Cherkashin VV. Accuracy of fabrication of diffractive optical elements by means of laser writing systems with circular scanning [In Russian]. *Computer Optics* 1997; 17: 63-74.
- [15] Poleshchuk AG, Cherkashin VV, Kharisov AA, Korolkov VP, Koronkevich VP. Accuracy potential of circular laser writing of DOEs. *Proc of SPIE* 1998; 3348: 58-68. DOI: 10.1117/12.302509.
- [16] Poleshchuk AG, Khomutov VN, Matochkin AE, Nasyrov RK, Cherkashin VV. Laser interferometers for control of optical surface shape. *Photonics* 2016; 4: 38-51.
- [17] Poleshchuk AG, Korolkov VP, Cherkashin VV, Reichelt S, Burge JH. Methods for minimizing the errors in direct

- laser writing of diffractive optical elements [In Russian]. *Avtometriya* 2002; 38(3): 3-19.
- [18] Polyshuk A, Matochkin A. Laser testing methods for aspheric optics [In Russian]. *Photonica* 2011; 2: 38-44.
- [19] Burge JH, Anderson DS, Ketelsen DA, West SC. Null test optics for the MMT and Magellan 6.5-m $f/1.25$ primary mirrors. *Proc SPIE* 1994; 2199: 658-669. DOI: 10.1117/12.269063.
- [20] Poleshchuk AG, Burge JH, Churin EG. Design and application of CGH for simultaneous generation several specified wavefronts. *EOS Topical Meeting on Diffractive Optics*, Jena, Germany, 23-25 August 1999; 22: 155-156.
- [21] Beyerlein M, Lindlein N, Schwider J. Dual-wave-front computer-generated holograms for quasi-absolute testing of aspherics. *Appl Opt* 2002; 41(13): 2440-2447. DOI: 10.1364/AO.41.002440.
- [22] Reichelt S, Pruss C, and Tiziani HJ. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms. *Appl Opt* 2003; 42(22): 4468-4479. DOI: 10.1364/AO.42.004468.
- [23] Gao G, Lehan J, Griesmann U. Dual-CGH interferometry test for X-ray mirror mandrels. *Proc SPIE* 2009; 7389: 73891B. DOI: 10.1117/12.830659.
- [24] Ping S, Jianshe M, Qiaofeng T, Guoguo K, Yi L, Guofan J. Computer generated hologram null test of a freeform optical surface with rectangular aperture. *Opt Eng* 2012; 51(2): 025801. DOI: 10.1117/1.OE.51.2.025801.
- [25] Poleshchuk AG, Nasyrov RK. Aspherical wavefront shaping with combined computer generated holograms. *Opt Eng* 2013; 52(9): 091709. DOI: 10.1117/1.OE.52.9.091709.
- [26] Korolkov VP, Konchenko AS. Spectrophotometric method for measuring the groove depth of calibration reflection gratings. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2012; 48(2): 211-217.
- [27] Korolkov VP, Konchenko AS, Cherkashin VV, Mironnikov NG, Poleshchuk AG. Etch depth mapping of phase binary computer-generated holograms by means of specular spectroscopic scatterometry. *Opt Eng* 2013; 52(9): 091722. DOI: 10.1117/1.OE.52.9.091722.
- [28] Korolkov VP, Ostapenko SV. Characterization of profilograms of piecewise-continuous diffraction microrelief. *Journal of Optical Technology* 2009; 76(7): 402-407. DOI: 10.1364/JOT.76.000402.
- [29] Poleshchuk AG. Fabrication of high-efficiency diffractive optical elements using half-tone and photorastered technologies [In Russian]. *Avtometriya* 1991; 6: 54-61.
- [30] Xinhui N, Nickhil J, Junwei B, Spanos CJ. Specular Spectroscopic Scatterometry. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 2001; 14(2): 97-111. DOI: 10.1109/66.920722.
- [31] Piegari A, Masetti E. Thin film thickness measurement: a comparison of various techniques. *Thin Solid Films* 1985; 124(3-4): 249-257. DOI: 10.1016/0040-6090(85)90273-1.
- [32] Babin SV, Doskolovich LL, Kadomin II, Kadomina EA, Kazansky NL. Trapezoidal diffraction grating profile parameters estimation based on polynomial approximations of the reflected field. *Computer Optics* 2009; 33(2): 156-161.
- [33] Kruchinin DYu, Yakovlev OB. Study of the angular errors of circular optical scales fabricated by means of the CLWS-300 laser image generator. *Journal of Optical Technology* 2011; 78(6): 383-385.
- [34] Kir'yanov VP, Nikitin VG. Measurement of efficiency of diffractive optical elements by scanning method [In Russian]. *Avtometriya* 2004; 40(5): 82-93.
- [35] Cai W, Zhou P, Zhao C, and Burge JH. Diffractive optics calibrator: measurement of etching variations for binary computer-generated holograms. *Applied Optics* 2014; 53(11): 2477-2486. DOI: 10.1364/AO.53.002477.
- [36] Khomutov VN, Poleshchuk AG, Cherkashin VV. Measurement of diffraction efficiency of DOE in many diffractive orders. *Computer Optics* 2011; 35(2): 196-202.

Authors' information

Alexander Grigorievich Poleshchuk (b. 1950). He received PhD degrees in 1980 and Doctor of Technical Science degrees in 2003. He is head of Diffractive Optics laboratory at IAE SB RAS. His research interests are computer optics, laser interferometry and laser technology. E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su.

Victor Pavlovich Korolkov (b. 1960) graduated from Novosibirsk State University in 1982. He received his PhD and DrSc degrees in Technical Sciences in 2000 and 2014, correspondingly. He is currently leading staff scientist in Diffractive Optics laboratory at IAE SB RAS. E-mail: victork@iae.nsk.su.

Ruslan Kamilyevich Nasyrov (b. 1982) graduated from Novosibirsk State University in 2005. In 2009 he defended PhD thesis. He is currently senior researcher in in Diffractive Optics laboratory of Institute of Automation and Electrometry SB RAS. E-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru.

Vladimir Nikolayevich Khomutov, (b. 1987) graduated from Novosibirsk State Technical University in 2010, majoring in Physics of Optical Phenomena. Currently he works as the junior research assistant at the Diffractive Optics laboratory of Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IAE SB RAS). E-mail: v.n.khomutov@gmail.com.

Alexander Sergeevich Konchenko (b. 1988) graduated from Novosibirsk State University in 2012, specializing in Optics. He is currently a post-graduate student at IAE SB RAS. E-mail: as_konch@ngs.ru.

Received September 1, 2016. The final version – December 11, 2016.