

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С МИКРОРЕЛЬЕФОМ

А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.Н. Хомутов, А.С. Конченко

ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Доклад посвящен методам контроля оптических элементов с микрорельефом (дифракционных, микрооптических, конформальных), разработанных в ИАиЭ СО РАН.

Ключевые слова: методы оптического контроля, дифракционные оптические элементы, микрооптические элементы, конформальные элементы, синтезированные голограммы

Введение

Разработка методов изготовления дифракционных и микрооптических элементов стимулирует развитие специализированных неразрушающих методов контроля их микрорельефа и интегральных характеристик [1-5]. 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.

1. 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, не зависимо от типа профилометра. В качестве такого критерия предложено использовать аппроксимированную глубину [6]. Метод определения этой величины показан на рис. 1. Расчетный микрорельеф 1, сформированный каким-либо методом на поверхности пленки или подложки [7], 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 разница 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 ДОЭ по отношению к направляющим системы сканирования профилометра вносит ошибку,

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

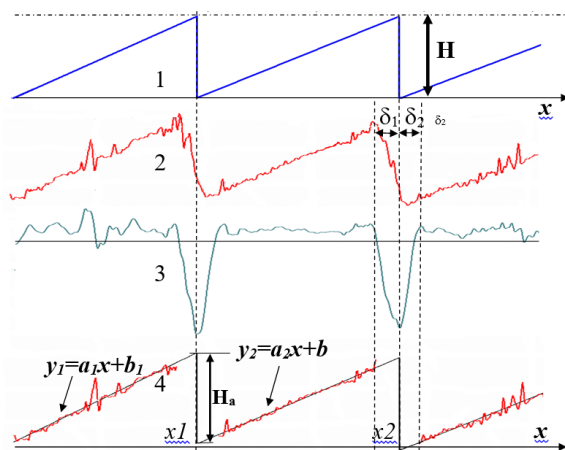


Рис.1. Метод определения аппроксимированной глубины.

Линейная аппроксимация в описанном выше методе может быть заменена на нелинейную в случае технологических нелинейностей или нелинейной расчетной форме 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.

2. Контроль конформальных элементов

Конформальные корректоры (КК) используются для компенсации искажений волнового фронта светового пучка, проходящего через широкоапертурные монокристаллические стержни из $YAG:Nd^{3+}$, которые применяются в мощных твердотельных лазерах в качестве активных элементов [8]. Рельеф КК aberrаций формируется на первой стадии в фоторезисте с помощью полутонной 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), основанный на измерении спектра пучка белого света, зеркально отраженного от поверхности [9]. Для данного угла падения света α и толщины слоя фоторезиста H экстремумы интенсивности в спектре отраженного света будут наблюдаться при волновых числах (определяемых как $k=1/\lambda$), равных:

$$k_i = \frac{m \cdot \cos(\alpha)}{4H \cdot n_i(k_i)} \quad (1)$$

где m – количество полувольт, укладываемых в оптическую разность хода, n_i – коэффициент преломления при волновом числе k_i . Анализируя ряд экстремумов, можно определить усредненную толщину слоя из выражения (1):

$$H = \frac{\cos(\alpha)}{4(N-1)} \cdot \sum_{i=1:N-1} \frac{1}{(k_{i+1} \cdot n(k_{i+1}) - k_i \cdot n(k_i))},$$

где N – количество анализируемых экстремумов.

Точность метода зависит от трех основных факторов – точности измерения длины волны в спектре отраженного света, неопределенности угла падения и точности определения коэффициента преломления.

Для автоматизации процесса измерения формы микрорельефа конформальных и дифракционных оптических элементов был разработан и реализован сканирующий прибор для измерения спектра зеркального отражения поверхности (Рис. 2 а) на основе волоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048*16-UA-50 и волоконного источника света AvaLight-DH-S-DUV. Оптическая схема прибора, показанная на рис. 2 а, включает 3 зеркальных объектива со следующими параметрами: увеличение 15X, апертура 0,28, рабочий отрезок 24,5 мм. Выбор зеркальных объективов вызван отсутствием у них хроматических аберраций. 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. Использование трех объективов и частичного заполнения апертуры обусловлено необходимостью фильтрации дифракционных порядков отличных от нулевого при измерении дифракционных элементов, так как в этом случае на спектрометр должен поступать только отраженный пучок в нулевом порядке дифракции. Оптическая система переносит изображение торца волокна 1:1 на исследуемую поверхность и затем на торец волокна спектрометра. В приборе были использованы волокна с диаметром сердцевины 100 мкм. При одностороннем прохождении пучков через объективы с апертурой 0,28 вариация углов падения лучей на исследуемую поверхность приводит к увеличению погрешности измерения на +2,5%.

На рис. 2, б показана карта 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. По краю элемента заметны искаженные результаты измерений, которые связаны с тем, что часть сканирующего пучка вышла за край подложки.

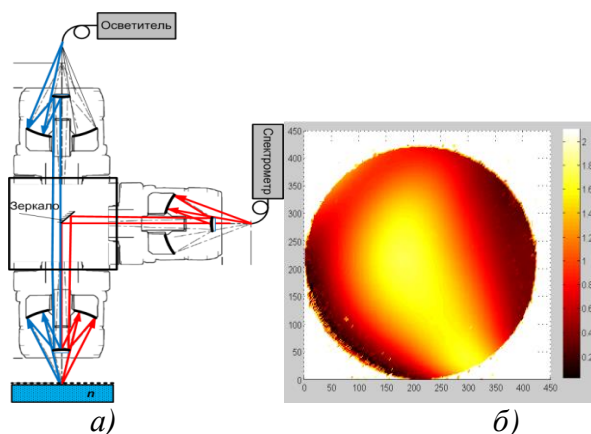


Рис.2. Схема прибора для измерения распределения толщины пленки фоторезиста (а) и измеренное распределение толщины (б).

Аналогичные бесконтактные измерения с высокой производительностью не возможны при использовании обычных оптических профилометров. Выбранный метод измерения практически не зависит от неплоскостности подложки, на которой нанесен фоторезист. Это обстоятельство дает существенное преимущество перед интерферометрией, используемой для контроля микрорельефа КК, сформированного на поверхности кварцевой подложки.

3. Контроль дифракционной эффективности

Одной из важнейших характеристик дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является дифракционная эффективность (ДЭ). Измерение ДЭ в поляризованном свете позволяет выявить эффекты, возникающие при дифракции света на структурах с размером зон, соизмеримым с длиной волны света. Точное измерение ДЭ особенно необходимо при создании ДОЭ, принцип работы которых основан на управлении интенсивностью дифрагированного оптического излучения, например, дифракционных аттенюаторов [10], или его точном дозировании, например, комбинированных синтезированных голограммах для контроля асферики [11].

Для точного контроля ДЭ ДОЭ разработан автоматизированный стенд [12], основанный на сканирующем методе. Оптическая схема стенда показана на рис. 3, а. Стенд работает по следующему принципу: сканирующий пучок света, генерируемый лазерным модулем 1, фокусируется объективом 4 на поверхность исследуемого ДОЭ 5, образуя световое пятно S_i . Дифрагированный свет попадает на матовый экран 7, откуда с помощью объектива 9 проецируется на матрицу цифровой видеокамеры 10. Использование матового экрана позволяет расширить возможную рабочую область и производить измерение сразу в нескольких 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 каждого дифракционного порядка каждой точки траектории и представляет результаты в виде карты распределения ДЭ рис.3, б.

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 11 вводится для вращения плоскости поляризации, когда необходимо исследовать влияние поляризации излучения на ДЭ ДОЭ. Коллективная линза 8 в оптической схеме измерительной системы необходима для корректировки диаграммы направленности дифрагированного света.

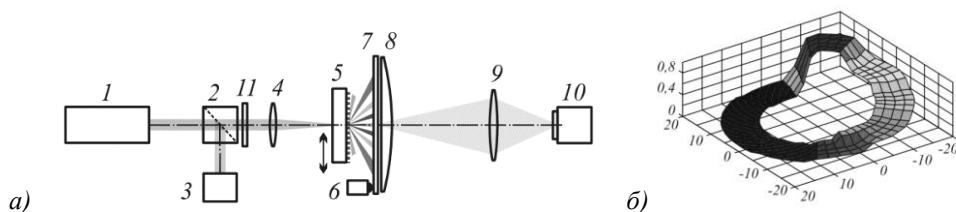


Рис.3. Оптическая схема стенда для измерения ДЭ ДОЭ (а) и измеренная карта распределения ДЭ(б).

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 [13], полученные карты распределения ДЭ могут подвергаться дальнейшему анализу и компьютерной обработке с целью расчёта этих параметров.

4. Контроль многоуровневых синтезированных голограмм для ДУФ диапазона

При мелкосерийном заказном производстве многоуровневых синтезированных голограмм (МСГ) 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 голограмм практически затруднен. Для решения этой проблемы предложен метод на основе анализа тестовых линейных решеток с такой же глубиной рельефа, что и у МСГ и конфигурации измерения на отражение с лазерным источником освещения, имеющим длину волны, равную удвоенной глубине микрорельефа с учетом наклонной геометрии падения пучка. На рис. 4 показана оптическая схема измерительной установки. Для предотвращения интерференции с пучком, отраженным от обратной стороны подложки, на нее наносится слой глицерина и копировальная бумага с матовой поверхностью. Угол падения светового пучка на подложку α является подгоночным параметром и выбирается так, чтобы соблюдалось равенство

$$H_p = \lambda \cdot \cos(\alpha) / 2,$$

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

СГМ, для тестирования которых разрабатывался, данный метод, изготавливались методом проекционной фотолитографии с растрованным фотошаблоном [6]. На кварцевой подложке диаметром 100 мм печатались 20 голограмм 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 СГМ средняя ДЭ в первом порядке составила 93% при максимальном значении 96% и минимальном 84%. Такой разброс ДЭ был связан с плановой вариацией дозы экспозиции при проекционной печати. Средняя ДЭ нулевого порядка составила 0,7%.

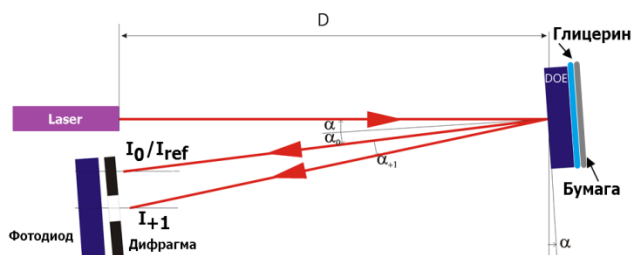


Рис. 4. Схема установки для измерения дифракционной эффективности на отражение.

5. Контроль погрешности топологии дифракционных структур

Основной источник искажений волнового фронта ДОЭ обусловлен ошибками изготовления структуры самого элемента [2]. Погрешность волнового фронта ΔW , вносимая ДОЭ и включающая любые неточности изготовления структуры, описывается уравнением $\Delta W = -m\lambda\delta/S$, где m – порядок дифракции, λ – длина волны света и S – локальный период зон ДОЭ, δ – локальная ошибка искажения микроструктуры (в направлении, перпендикулярном границам зон).

При изготовлении ДОЭ с помощью КЛЗС искажения волнового фронта возникают из-за ошибки радиальной координаты записи и имеют две составляющие: ошибка фиксации начала координат и ошибка, вызванная дрейфом координаты во время записи. 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 [14]. Однако если ДОЭ формирует асферический волновой фронт, такой контроля невозможен.

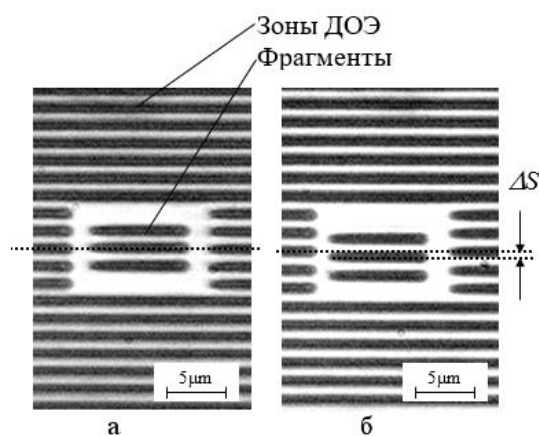


Рис.5. Микрофотографии фрагментов амплитудного ДОЭ (хром на стекле) записанные без ошибки (а) и с ошибкой (б) позиционирования $\Delta S = 0.4S \approx 0.56$ мкм.

Для контроля точности изготовления ДОЭ с произвольной структурой был предложен метод, основанный на разделении процесса записи на два этапа. 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 можно пренебречь влиянием дрейфа. На втором этапе записывается весь ДОЭ, кроме тех мест, где уже были записаны фрагменты. На рис. 5 в качестве примера приведены микрофотографии двух участков записанной зонной пластинки с этими фрагментами. Измерение под микроскопом локального сдвига зон позволяет определить величину ошибки позиционирования на данном радиусе записи: $\Delta S \approx 0$ для (а), и $\Delta S \approx 0.56 \mu\text{m}$ (б). При $S = 1.4$ мкм это соответствует погрешности волнового фронта $\Delta W = 0.4 \cdot \lambda$. Фрагменты могут записываться в произвольных областях ДОЭ, но для удобства измерения они располагаются вдоль радиуса.

Заключение

Представлены некоторые методы контроля оптических характеристик дифракционных (бинарных и многоуровневых), микрооптических и конформальных элементов в процессе изготовления.

Литература

1. Волков, А. В. Контроль параметров микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием тестовых дифракционных структур // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2001. – №. 12. – С.179-185.
2. Корольков, В.П. Методы сертификации дифракционных оптических элементов для контроля асферической оптики/ В.П.Корольков, Р.К. Насыров, А.Г. Полещук, К. Прус, С. Райхельт. // Автометрия. –2005. –№6. –стр. 115-125.
3. Бабин, С.В. Определение параметров профиля трапецеидальной дифракционной решетки на основе полиномиальных аппроксимаций отраженного поля/ С.В. Бабин, Л.Л. Досколович, И.И. Кадолин, Е.А. Кадомина, Н.Л. Казанский//Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. – №. 2.- С.156-161.
4. Колючкин, В.В. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов/ В.В.Ключкин, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев, В.Е. Талалаев, И.К. Цыганов. //Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – №. 4.- С.515-520.
5. Досколович, Л. Л. Расчет и исследование дифракционных микро-и наноструктур //Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 32. – №. 2. – С.136-150.
6. Полещук, А.Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий // Автометрия. —1991.—№ 6.—С.54-61.
7. Korolkov, V. P. Unification of approaches to optimization and metrological characterization of continuous-relief diffractive optical elements/ S. V. Ostapenko, R. K. Nasyrov, A. S. Gutman, and A. R. Sametov// Proc. SPIE. —2010. —Vol. 7718. — 77180S.
8. Корольков, В. П. Конформальные оптические элементы для коррекции искажений волнового фронта в активных элементах YAG : 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.
9. 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), —С.091722.
10. Poleshchuk, A.G. Diffractive variable attenuator for femtosecond laser radiation control / A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov, V.V. Cherkashin, M.V. Dubov, V.M. Mezentsev, I. Bennion // Appl. Opt. – 2009. – Vol. 48. – P. 708-711. – ISSN 1539-4522.
11. Poleshchuk, A.G. Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces / A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov, J.-M. Asfour // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, N 7. – P. 5420-5425. – ISSN 1094-4087.
12. Хомутов, В.Н. Измерение дифракционной эффективности ДОЭ по многим порядкам дифракции / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 196-202. – ISSN 0134-2452.
13. Белоусов, Д.А. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой/ Д.А. Белоусов, А.Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т.39, №5. – С.678-687
14. Полещук, А. Г. Лазерная интерферометрическая система ФТИ-100 с фазовым сдвигом для прецизионного оптического контроля/ А.Г. Полещук, Р.К. Насыров, А.Е. Маточкин, В.В. Черкашин, В.Н. Хомутов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2011. – Т. 5. – №. 2. –С.137-141.