

Запись и обработка микроизображений для контроля точности изготовления прецизионных синтезированных голограмм

Р.В. Шиманский¹

¹Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Академика Коптюга, д. 1, Новосибирск, Россия, 630090

Аннотация. Разработан и исследован метод контроля точности изготовления прецизионных синтезированных структур в полярной системе координат с использованием специальных микроизображений в виде линейных решёток, записываемых по двум ортогональным направлениям. Внутренняя часть каждого микроизображения формируется перед записью прецизионной структуры, а вторая часть во время записи структуры. Сдвиг между первой и второй частью микроизображения позволяет определить ошибку дрейфа, сдвига подложки и т.п. по каждой из координат. Метод позволяет повысить точность и достоверность сертификации точности изготовления прецизионных синтезированных структур. Исследованы две топологии формируемых микроизображений и проведён сравнительный анализ результатов их обработки.

1. Введение

Контроль точности изготовления прецизионных синтезированных структур или дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является актуальной задачей, в особенности для применения ДОЭ при интерферометрических измерениях асферических волновых фронтов. Погрешности изготовления структуры ДОЭ влияют на точность и достоверность результатов измерения, так как ошибки и неточности, возникающие в процессе записи структуры ДОЭ, приводят к появлению погрешностей волнового фронта, формируемого этим ДОЭ. Контроль этих погрешностей позволяет определить качество изготовленного ДОЭ и оценить точность формируемого им волнового фронта, что позволяет в том числе существенно улучшить достоверность измерения формы поверхности асферической оптики.

Погрешность изготовления структуры ДОЭ сказывается на точности и достоверности результатов измерения. То есть, ошибки и неточности, возникающие в процессе изготовления структуры ДОЭ, приводят к появлению погрешностей волнового фронта, формируемого ДОЭ. Эти погрешности могут быть определены (в долях длины волны света) как [1]:

$$W = m\lambda \frac{s_i}{T}, \quad (1)$$

где m - порядок дифракции; T - период дифракционной структуры в данной области ДОЭ; s_i - погрешность координаты записи (область с координатами r_i, φ_i) в направлении перпендикулярном зонам ДОЭ.

В ИАиЭ СО РАН создана прецизионная круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) CLWS300IAE, оптимизированная для записи таких элементов [2]. Не смотря на высокую скорость сканирования в КЛЗС, время записи ДОЭ больших размеров может достигать десяти часов и более. В течение этого времени абсолютная погрешность позиционирования записывающего пучка по всему полю ДОЭ не должна превышать 10 нанометров. Для выявления ошибок, возникающих в процессе записи, таких, например, как дрейф системы радиального позиционирования относительно шпинделя, сдвиг подложки на планшайбе шпинделя и др., ранее был предложен метод сертификации процесса записи [3, 4], основанный на записи небольших микроизображений, состоящих из специальных решёток. Данный метод хорошо зарекомендовал себя, однако имеет ограниченную точность и позволял контролировать погрешность записи только по радиальной (X) координате.

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследования нового метода [5] контроля точности изготовления дифракционной структуры ДОЭ по расположению специальных микроструктур, как по радиальной координате, так и в перпендикулярном ей направлении при изготовлении ДОЭ в полярной системе координат. Данный метод также позволяет существенно увеличить точность измерения погрешности изготовления ДОЭ.

2. Погрешности изготовления прецизионных ДОЭ

Изготовление структуры ДОЭ производится методом прямой лазерной записи на вращающуюся оптическую заготовку, покрытую пленой хрома. Структура ДОЭ представляет собой набор элементарных ячеек с адресацией в полярной системе координат. Ячейки, перекрываясь, образуют картину полос или дифракционных зон. Адрес записи произвольной ячейки i в полярной системе координат определяется как $P_i(r_i, \varphi_i)$, где r_i и φ_i – радиальная и угловая координаты записи (φ_i определяется как разность между началом угловой координаты ($\varphi=0$) и текущим угловым положением вращающейся оптической заготовки). Величина r_i отсчитывается от точки начала полярной системы координат $r_0=0$, которой считается точка совмещения оси вращения оптической заготовки с центром записывающего сфокусированного пучка лазерного излучения. Процесс записи вносит погрешности в структуру ДОЭ. Основная погрешность – это расстояние между расчетной P_i и записанной P_i' координатами точек. Величина абсолютной погрешности координаты записи определяется как $\varepsilon_i = P_i - P_i'$. Контроль погрешности записи ДОЭ является одной из важнейших частей процесса изготовления прецизионных синтезированных голограмм.

3. Метод контроля погрешности изготовления структуры дифракционных оптических элементов

Для осуществления контроля ДОЭ по двум координатам было предложено формировать специальные микроструктуры (координатные метки) [5] в виде решёток с периодом 2-3 мкм. Данные метки записываются на заготовке по той же технологии, что и сам ДОЭ, в специальных областях размером 100 x 200 мкм с заданными интервалами по радиальному направлению и после завершения записи производится измерение их характеристик. На рисунке 1 приведен пример расположения микроструктур на оптической заготовке. Каждая координатная метка состоит из двух групп периодических решёток. Внутренняя часть каждой метки формируется перед записью ДОЭ, а вторая часть во время записи структуры ДОЭ. Метки формируются в небольших областях непосредственно в рабочем поле ДОЭ. Сдвиг между первой и второй частью метки позволяет определить ошибку дрейфа, сдвига подложки и т.п. по каждой из координат. Для того чтобы регистрировать погрешность изготовления ДОЭ одновременно, как по координате X , так и по координате Y , координатные метки наносятся попарно, а направления штрихов периодических решеток в них ортогональны. На рисунке 2 схематично изображена пара координатных меток (далее двухкоординатная метка).

Размер первой группа периодических решеток выбирается так, чтобы время нанесения было небольшим и за это время уход координаты записывающего лазерного пучка заведомо отсутствовал, или был мал. Например, если размер координатной метки составляет $h=30 \times 100$

мкм, то при скорости вращения оптической заготовки $n=20$ об/сек, и шаге перемещения записывающего лазерного пучка $s=0.5$ мкм, время нанесения координатной метки составит около $t_1=5$ сек., а всей линейки, состоящей, например, из 10 координатных меток, составит около $t_2=50$ сек. При характерной величине температурного дрейфа устройства лазерной записи около 1 мкм за 2.5 часа работы, величина дрейфа за время t_2 нанесения линейки будет менее 5 нм, что много меньше шага перемещения s . Т.е. можно считать, что все первые группы периодических решеток в координатных метках нанесены без погрешностей.

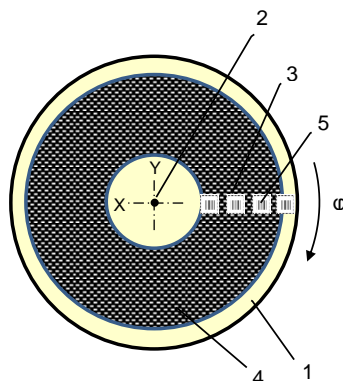


Рисунок 1. Схема расположения координатных меток, 1 – оптическая заготовка, 2 – ось вращения оптической заготовки, 3 – контрольное окно, 4 – дифракционная структура, 5 – координатная метка.

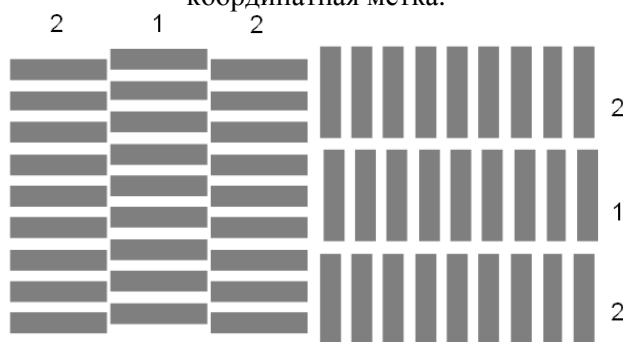


Рисунок 2. Двухкоординатная метка с двумя группами периодических решеток, где 1 - группа периодических решеток, записываемая перед записью, 2 – группа, записываемая во время записи ДОО.

4. Экспериментальная запись ДОО с использованием двухкоординатных меток

Сложность записи двухкоординатных меток обусловлена малым периодом решётки (2 мкм), особенностью формирования структуры в сканирующих системах, особенностью подбора мощности записи и её диапазоном для круговых лазерных записывающих систем. Для определения наилучших параметров записи меток и отладки алгоритма их записи был проведен ряд предварительных тестовых записей серий координатных меток на разных радиусах, с разными параметрами шага записи, параметрами мощности, количеством проходов и т.п. На рисунке 3 приведён пример фрагмент фотографии, сделанной на микроскопе с 100X увеличением, серии координатных меток записанных на радиусе 10 мм с разными параметрами записи по мощности.

Используя результаты тестовых записей была проведена экспериментальная запись ДОО с использованием двухкоординатных меток. Изготовленный ДОО является зонной пластиной диаметром 32 мм со сферическим фронтом с радиусом 25 мм. Изготовление структуры ДОО производилась на КЛЗС300 методом прямой лазерной записи на вращающуюся оптическую заготовку из ситалла, покрытую пленой хрома. Запись производилась от максимального радиуса к центру с предварительным совмещением записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры [6] и с выключенным режимом динамической коррекции

координаты лазерного пучка по радиальной координате [7]. Время записи ДОЭ составило примерно 2 часа.

На рисунке 4 приведена фотография изготовленного экспериментального ДОЭ с двухкоординатными метками.

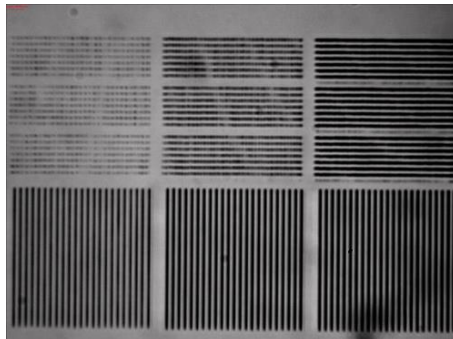


Рисунок 3. Фрагмент микрофотографии тестовой записи серии координатных меток на радиусе 10 мм с разными параметрами по мощности.

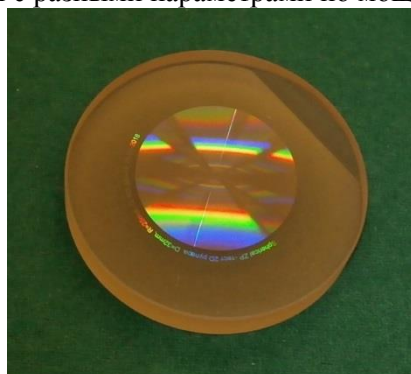


Рисунок 4. Фотография тестового ДОЭ диаметром 32 мм со сферическим волновым фронта с радиусом 25 мм.

На рисунке 5 и 6 приведены фотографии двухкоординатных меток соответственно на радиусах 2 мм и 11 мм сделанные на микроскопе с 100X увеличением. На рисунке 6 (радиус 2 мм) на правой координатной метке, которая регистрирует погрешность записи по радиальной координате, хорошо видно наличие смещения внутренней группы периодических решёток относительно внешних в отличие от соответствующей координатной метки на радиусе 11 мм. Смещение структур является результатом дрейфа радиальной координаты КЛЗС300 за 2 часа записи, что является характерным смещением для данной системы. Так как при экспериментальной записи режим динамической коррекции координаты лазерного пучка по радиальной координате [7] был выключен данная погрешность стала наблюдаться визуально. При обычных записях прецизионных дифракционных структур данный режим включен и без специальной обработки полученных изображений координатных меток погрешность определить с необходимой точностью не представляется возможным.

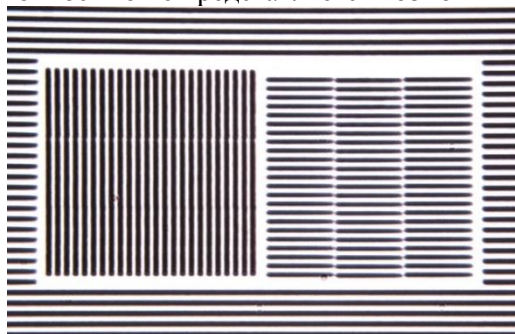


Рисунок 5. Духкоординатная метка экспериментальной записи на радиусе 11 мм.

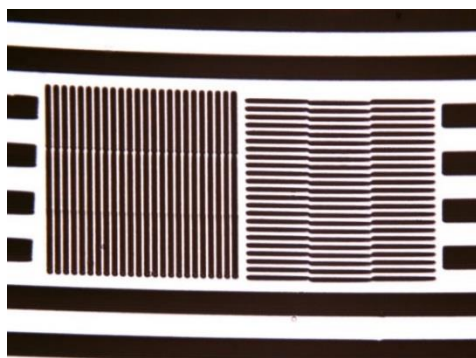


Рисунок 6. Двухкоординатная метка экспериментальной записи на радиусе 2 мм.

5. Определение величины погрешности изготовления ДОЭ

Погрешность изготовления ДОЭ по двум направлениям (W_x и W_y) определяют по формуле (2) в каждой координатной метке определялась по взаимному смещению первой (внутренней) группы периодических решеток относительно второй (внешней) группы периодических решеток по формуле:

$$W_x = m\lambda \frac{S_x}{T_x} \quad \text{и} \quad W_y = m\lambda \frac{S_y}{T_y}. \quad (2)$$

Для точного измерения смещения штрихов решеток нами было предложено применить метод обработки интерферограмм. Группы периодических решеток в координатных метках представляются как интерферограммы, где изображения штрихов могут быть представлены как интерференционные полосы. Смещение S_x и S_y двух групп периодических решеток в каждой паре координатных меток определяют по их сглаженным изображениям методом расшифровки интерферограмм [8]. На рисунке 7 приведён пример обработки, и трекинга штрихов решётки исходного изображения одной контрольной метки, на основе которых рассчитывается полутоновая карта фазового сдвига полос. Величина смещения определяется по графику как $S=0.4T$. В данном примере, при $T=3$ мкм, смещение, обусловленное погрешностью изготовления ДОЭ составляет $S= 1.2$ мкм. Для уменьшения погрешности измерения и устранения случайных шумов проводится усреднение полутоновой карты по нескольким сечениям.

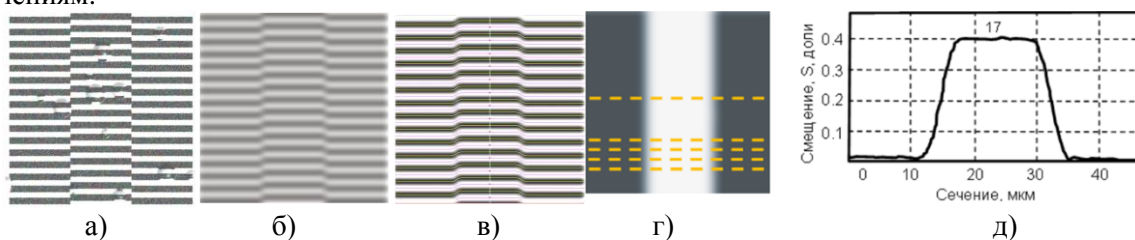


Рисунок 7. Пример обработки координатной метки: а - исходная фотография, б - сглаживание, в – трекинг полос, г - полутоновая карта фазового сдвига, д - профиль фазового сдвига.

6. Результаты расчёта погрешности по радиальной координате записанного экспериментального ДОЭ

Используя предложенный метод был произведен расчёт погрешности по радиальной координате записанного экспериментального ДОЭ. На рисунке 8 приведена диаграмма сравнения результатов периодического поиска центра [6, 7], выполняемого в процессе записи ДОЭ (кривая с кружками, где кружками обозначены координаты в которых производился периодический поиска центра) и результаты расчёта предложенным методом (ромбы). Разница измерения погрешности записи по радиальной координате между двумя методами измерения

не превышает 10 нанометров, что соответствует поставленной нами цели для измерения точности погрешности записи ДОЭ.

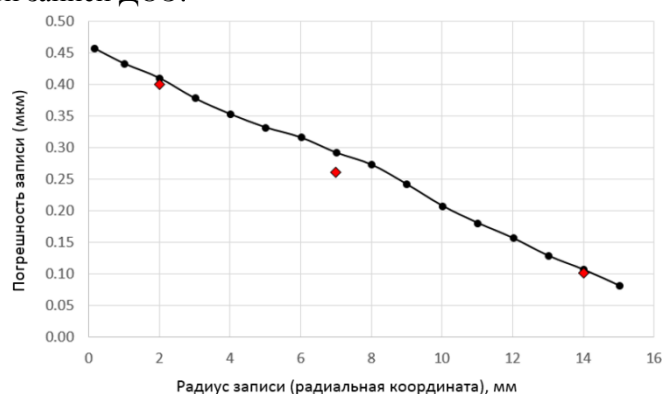


Рисунок 8. Диаграмма ухода центра по радиальной координате (кривая с кружками) и результаты измерения погрешности записи по радиальной координате предложенным методом (ромбы).

7. Заключение

Разработан и исследован новый метод контроля погрешности записи структуры ДОЭ в полярной системе координат с использованием двухкоординатных меток в виде линейных решеток, ориентированных по двум ортогональным осям. Внутренняя часть каждой метки формируется перед записью ДОЭ, а вторая часть во время записи структуры ДОЭ. Метки формируются в небольших областях непосредственно в рабочем поле ДОЭ. Сдвиг между первой и второй частью метки позволяет определить ошибку дрейфа, сдвига подложки и т.п. по каждой из координат. Для проверки метода была произведена экспериментальная запись ДОЭ с использованием двухкоординатных меток. Экспериментальный ДОЭ является зонной платиной диаметром 32 мм со сферическим фронтом с радиусом 25 мм. Изготовление структуры ДОЭ производилась на КЛЗС300 методом прямой лазерной записи на вращающуюся оптическую заготовку из ситалла, покрытую пленкой хрома. Результаты эксперимента показали, что предложенный метод позволяет определять погрешности записи с точностью не более 10 нанометров, что примерно на порядок лучше, чем можно получить при использовании стандартного метода. Более того, описанный метод позволяет одновременно определять погрешность по двум ортогональным осям. Метод позволяет повысить точность и достоверность сертификации ошибок изготовления ДОЭ, предназначенных для контроля формы асферической оптики, в том числе внеосевых сегментов, цилиндров, торических линз, поверхностей свободной формы и т.п.

8. Литература

- [1] Chang, Yu-C. Error analysis for CGH optical testing / Yu-C. Chang, J. Burge // Proc. SPIE. – 1999. – Vol. 3782. – P. 358-366.
- [2] 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 [et al.] // Appl. Opt. – 1999. – Vol. 38. – P. 1295-1301.
- [3] Poleshchuk, A.G. Methods for certification of CGH fabrication / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.V. Cherkashin, J. Burge // Trends in Optics and Photonics (TOPS). – 2002. – Vol. 75.
- [4] 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. – № 3. – С. 3-19.
- [5] Полещук, А.Г. Способ контроля погрешности изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ). / А.Г. Полещук, Р.В. Шиманский // Патент РФ 2587528. Оpubл. 20.06.2016. Бюл. № 17.

- [6] Шиманский, Р.В. Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при синтезе дифракционных оптических элементов в полярной системе координат / Р.В. Шиманский, А.Г. Полещук, В.П. Корольков, В.В. Черкашин // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 30-38.
- [7] Шиманский, Р.В. Динамическая коррекция координаты лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных элементов для контроля асферических зеркал / Р.В. Шиманский, А.Г. Полещук, В.П. Корольков, В.В. Черкашин // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 64-73.
- [8] Максимов, В.Г. Расчетный модуль для анализа волновых фронтов / В.Г. Максимов, С.А. Чудинов, Р.К. Насыров, А.Е. Маточкин // Известия вузов «Физика». – 2013. – Т. 56, № 9/2. – С. 212-214.

Благодарности

Выражаю благодарность зав.лаб. д.т.н. В.П. Королькову и с.н.с. к.т.н. Р.К. Насырову за помощь в консультации по вопросам технологии лазерной записи и оптических систем. Также выражаю благодарность ведущему инженеру-оптику А.Р. Саметову и ведущему инженеру-технологу А.И. Малышеву за подготовку и выполнение записей тестовых и экспериментальных ДОЭ на КЛЗС300.

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос.регистрации АААА-А17-117052210002-7) в ИАиЭ СО РАН. В исследованиях использовано оборудование Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

The writing and processing of micro-images to check the manufacturing accuracy of precision synthesized holograms

R.V. Shimansky¹

¹Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academician Koptyug ave. 1, Novosibirsk, Russia, 630090

Abstract. The method to check the manufacturing accuracy of precision synthesized structures using special micro-images written along two orthogonal directions at the manufacture of synthesized holograms in the polar coordinate system has been developed and investigated. The inside part of each micro-image is formed before the precision structure writing, and the second part is formed during the structure writing. The shift between first and second parts of the micro-image allows determine the error of drift, substrate shift, etc. for each of the coordinates. The method allows to increase the accuracy and reliability of the correctness certification of manufacturing of precision synthesized structures. Two topologies of the formed micro-images are investigated and a comparative analysis of the results of their processing is carried out.