

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 535.4 : 621.317

А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. В. Черкашин,
С. Райхельт, Дж. Бёдж

(Новосибирск, Россия – Туссон, США – Штутгарт, Германия)

МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ОШИБОК
ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Рассмотрены методы снижения ошибок изготовления бинарных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) путем оптимизации стратегии записи на лазерных системах с круговым сканированием. Показано, что измерение и регистрация параметров записывающей системы и окружающей среды в процессе записи гарантируют заданную точность изготовления элементов либо получение карты ошибок волнового фронта. Экспериментально исследованы aberrации волнового фронта осесимметричных ДОЭ, обусловленные ошибками изготовления. Идентифицированы различные типы волновых aberrаций, которые удалось связать с конкретными источниками ошибок записи. Интерферометрия волнового фронта, формируемого тестовыми зонными пластинками с апертурой до 0,45, показала, что среднеквадратичная ошибка волнового фронта не превышает $\lambda/100$.

Введение. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития оптики является широкое применение компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Эти элементы представляют собой тонкие рельефно-фазовые структуры и уже широко используются в оптических вычислительных устройствах, оптической памяти, дисплеях, датчиках и т. д. Их потенциальные возможности во многом определяются технологией изготовления, которая должна обеспечивать требуемые технические параметры. До последнего времени для изготовления ДОЭ применялись генераторы изображений, созданные для производства фотошаблонов интегральных схем. Запись изображения в них производится в фоторезисте, нанесенном на маскирующее покрытие, путем экспонирования микроэлементов фотошаблона в виде прямоугольников, трапеций и прямолинейных дорожек, ориентированных вдоль двух ортогональных осей x – y сканирующей системы. Применение таких систем для изготовления боль-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-15-99089).

шинства типов ДОЭ приводит к рассеянию света на углах микроэлементов и, как следствие, дополнительных шумов и искажений в формируемом изображении. Существует ряд типов ДОЭ, для описания которых предпочтительной является не прямоугольная, а полярная система координат. Например, синтезированные голограммы для контроля и аттестации асферических волновых фронтов главных зеркал современных телескопов должны иметь точность выполнения кольцевой дифракционной структуры не хуже 0,1 мкм, минимальный период менее 1 мкм и размеры в несколько сотен миллиметров [4]. Плоскостность оптической подложки, на которую производится запись, должна быть не хуже $\lambda/20$ [5]. Дифракционные элементы такого типа могут быть изготовлены в настоящее время с необходимой точностью и качеством только с помощью специализированных устройств с круговым сканированием сфокусированного пучка (лазерного или электронного) или алмазного резца [6]. Мы рассматриваем в данной работе только круговые лазерные записывающие системы (КЛЗС), хотя некоторые из предлагаемых методов повышения точности изготовления могут быть применены и для установок алмазного точения.

Одна из первых КЛЗС была создана в середине семидесятых годов [7] с целью изготовления осесимметричных синтезированных голограмм для проверки асферической оптики. Эта работа стимулировала создание различных типов КЛЗС и развитие соответствующих технологий изготовления ДОЭ [8–14]. Разработка методов изготовления ДОЭ в полярной системе координат была начата в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН) в середине 70-х годов. Основные усилия были направлены на создание прецизионных КЛЗС и разработку термохимической технологии получения фотошаблонов в тонких пленках хрома [8, 15–17]. В настоящее время КЛЗС, разработанные ИАиЭ СО РАН совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН, широко используются для изготовления ДОЭ как в России, так и в других странах (Италия, Германия, Китай) [18–20].

В данной работе рассматриваются характерные особенности КЛЗС [21], используемых для изготовления высокоточных ДОЭ большого размера, и основные источники ошибок данных систем записи. Обсуждается проблема оптимизации стратегии записи с целью уменьшения выявленных ошибок. Рассматриваются методы измерения и регистрации параметров записывающей системы в процессе записи ДОЭ, дающие возможность оценить независимо распределение ошибок микроструктуры элемента по радиальной и угловой координатам. Регистрируемые данные могут быть использованы как для внесения поправок непосредственно в процессе записи, так и учтены при дальнейшем использовании ДОЭ. В работе приводятся практические результаты записи ДОЭ, полученные на КЛЗС, действующих в ИАиЭ СО РАН (г. Новосибирск, Россия) и в Институте технической оптики (ИТО) (Университет г. Штутгарта, Германия).

1. Круговая лазерная записывающая система. На рис. 1 показана упрощенная блок-схема разработанной нами круговой лазерной записывающей системы [17]. Рассмотрим кратко ее основные узлы для более понятного описания методов записи.

1.1. Узел вращения. Подложка с нанесенным регистрирующим слоем фиксируется на планшайбе моторизованного аэростатического шпинделя с помощью вакуумного прижима. Датчик углового положения и система умножения и фазовой автоподстройки частоты формируют импульсы начала обо-

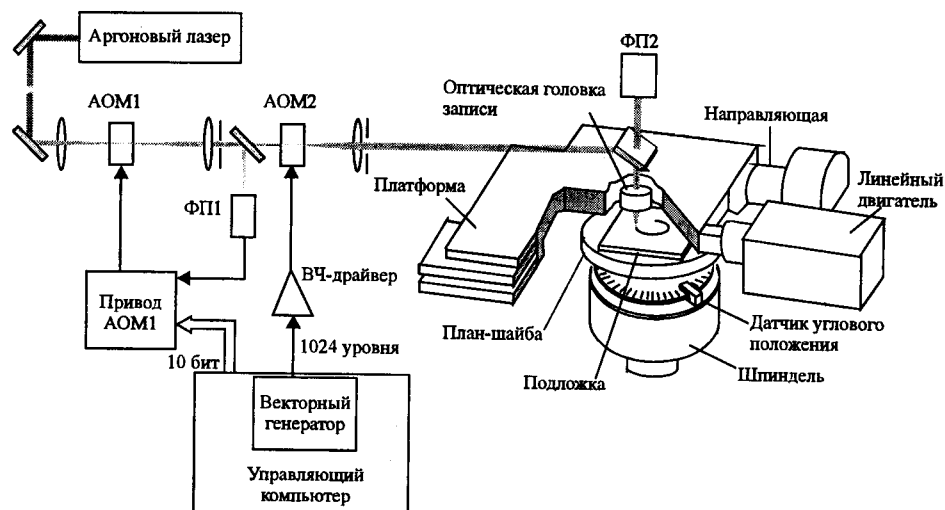


Рис. 1. Блок-схема круговой лазерной записывающей системы

рота и определенное количество синхроимпульсов на оборот. Эти импульсы используются для синхронизации модуляции лазерного записывающего пучка с вращением подложки.

1.2. *Узел радиального перемещения.* Радиальное перемещение оптической головки записи обеспечивается платформой на аэростатических подшипниках и линейным двигателем постоянного тока. Перемещение платформы контролируется с помощью лазерного интерферометра с дискретностью измерения около 0,6 нм [22]. Радиальное перемещение на величину до 10 мкм выполняется за время менее 50 мс. Точность удержания заданной координаты составляет 30 нм.

1.3. *Блок управления мощностью записывающего пучка.* Управление мощностью излучения аргонового лазера, работающего на длине волны 457 или 514 нм, осуществляется с помощью двух акустооптических модуляторов АОМ1 и АОМ2. Применение двух модуляторов позволяет расширить динамический диапазон управления мощностью пучка и разделить модуляцию по угловой и радиальной координатам. Первый модулятор АОМ1, охваченный обратной связью по сигналу с фотоприемника ФП1, выполняет две функции: регулирует мощность записывающего пучка в пределах 1024 уровней в зависимости от радиальной координаты и подавляет флуктуации мощности лазерного излучения. АОМ2 осуществляет бинарную или аналоговую модуляцию (1024 уровня) пучка с выхода АОМ1 в зависимости от угловой координаты. Модулирующий сигнал для ВЧ-драйвера второго модулятора формируется векторным генератором, установленным в управляющем компьютере. Цифроаналоговый векторный генератор формирует двухуровневый сигнал включения/выключения лазерного пучка при записи бинарных ДОЭ, а при записи многоуровневых ДОЭ – аналоговый сигнал, соответствующий уровню фазы в данной точке элемента [23]. Векторный генератор синхронизируется с вращением шпинделя по импульсам начала оборота и синхроимпульсам (частота до 40 МГц).

1.4. *Оптическая головка записи.* Оптическая головка перемещается вертикально на аэростатических подшипниках и формирует записывающее световое пятно. Положение фокальной плоскости микрообъектива (числовая

апертура 0,65) на поверхности подложки в процессе записи поддерживается с помощью системы автоматической фокусировки.

1.5. *Рабочие параметры и технические характеристики* разработанной КЛЗС следующие: максимальный диаметр области записи 300 мм; толщина подложек 1,5–30 мм; диаметр записывающего пятна (по уровню 0,5 от максимума) 0,5 мкм; скорость вращения 300–800 об/мин (относительная ошибка $3 \cdot 10^{-6}$); точность радиального позиционирования 30 нм (среднеквадратичное значение); точность измерения угловой координаты 1 угл. с (среднеквадратичное значение); длина волны записывающего пучка 457–514 нм (Ar^+ -лазер); время записи для растра с шагом 0,5 мкм в области диаметром 90 мм около 2 ч.

1.6. *Метод записи на пленках хрома.* Запись бинарных амплитудных микроструктур с помощью КЛЗС может быть осуществлена как посредством записи промежуточного изображения в фоторезисте, нанесенном на пленку хрома, так и методом прямой лазерной записи на пленках хрома, нанесенных на поверхность подложки. В последнем случае нагрев лазерным лучом вызывает появление тонкого оксидного слоя на поверхности и изменение химических свойств по всей толщине пленки [16]. Мощность записывающего пучка выбирается таким образом, чтобы получить дорожку заданной ширины и с достаточной оптической плотностью. После записи фотошаблона неэкспонированные участки пленки хрома удаляются в жидкостном щелочном травителе. Термохимический метод формирования дифракционных структур в пленках хрома является оптимальным при изготовлении высокоточных ДОЭ на нестандартных подложках, так как не требуются операции нанесения и проявления фоторезиста.

2. *Специфические источники ошибок КЛЗС.* Структура ДОЭ при записи на КЛЗС представляется гибридным точечно-векторным форматом данных: в направлении радиальной координаты используется дискретное представление с переменным размером элементарной ячейки (шаг сканирования по радиусу), а в направлении угловой координаты – набор элементарных векторов, начало и конец которых описывается в угловых единицах.

Для упрощения анализа структуру ДОЭ рассмотрим лишь в дискретном представлении. Поскольку при бинарной записи важны начало и конец векторов, то они могут быть представлены в виде ячеек с координатами $P_i(r_i, \theta_i)$ в полярной системе координат, где r_i – радиус записи (расстояние от оси вращения шпинделя до центра записывающего пятна лазера); θ_i – угловая координата центра записывающего пятна (определяемая количеством синхроимпульсов от фронта импульса начала оборота ($\theta = 0$) до текущего углового положения вращающегося стола). Процесс записи вносит ошибки в структуру изготавливаемого ДОЭ. Эти ошибки имеют две компоненты:

- разность между предполагаемыми (r_i, θ_i) и реальными (r'_i, θ'_i) координатами центра ячейки;
- различия в форме и размерах рассчитанной и реально записанной элементарной ячейки изображения (ошибка размера).

Первая компонента зависит от точности перемещения лазерного пучка по отношению к подложке. Вторая вызвана изменениями размера следа, оставляемого лазерным пучком. Обе эти компоненты определяют положение границы зоны при записи бинарных элементов. Локальная ошибка ζ искажения микроструктуры (в направлении, перпендикулярном границам

зон) для бинарных ДОЭ определяется усреднением положения внутренней и внешней границы зоны (ζ_{in} и ζ_{out}):

$$\zeta = (\zeta_{in} + \zeta_{out})/2. \quad (1)$$

Локальная ошибка искажения микроструктуры приводит к дополнительному фазовому сдвигу световой волны, проходящей через изготовленный ДОЭ. Этот фазовый сдвиг (ошибка волнового фронта W) может быть определен как [5, 24]

$$W = -m\lambda\zeta/p, \quad (2)$$

где m – порядок дифракции; λ – длина волны света; p – локальный период зон ДОЭ. Общая ошибка записи осесимметричных ДОЭ в основном определяется эффектами, описанными далее.

2.1. *Ошибка определения начала координат.* Ось вращения шпинделя должна быть началом полярной системы координат ($r = 0$) в КЛЗС. Однако очень точное определение положения оси вращения является серьезной проблемой. Смещения x_0 опорной точки лазерного интерферометра и y_0 траектории радиального движения пучка относительно центра вращающейся подложки являются причиной ошибки определения координаты текущей точки микроструктуры [14]. Реальной полярной координатой записываемой точки является $P'_i(r'_i, \theta'_i)$. Радиус r'_i и полярный угол θ'_i определяются как

$$r'_i = \sqrt{(r_i + x_0)^2 + y_0^2} \approx r_i + x_0 + y_0^2/2r_i, \quad (3a)$$

$$\theta'_i = \theta_i + \arctg[y_0/(r_i + x_0)]. \quad (3b)$$

2.2. *Дрейф начала координат в процессе записи.* Очевидно, что высокая точность записи возможна только при условии долговременной стабильности взаиморасположения механических узлов и параметров устройства. Однако они не остаются стабильными в результате воздействия нескольких факторов: прежде всего температурного дрейфа, расширения механических деталей шпинделя и интерферометра, а также изменения длины волны лазерного интерферометра. Величина температурного дрейфа зависит от постоянства температуры окружающей среды, переноса тепла от двигателя, электронных устройств и лазера. Влияние этого фактора минимизируется посредством работы КЛЗС в режиме прогрева в течение нескольких часов перед осуществлением записи ДОЭ.

2.3. *Ошибка траектории вращения.* Ошибка траектории вращения шпинделя – это отклонение траектории движения некоторой точки на вращающемся столе от движения по идеальной окружности. Эта ошибка состоит из девиации центра вращения шпинделя (эксцентриситет) и угловой девиации оси вращения (биение оси вращения). В результате реальная координата записываемой точки может быть описана следующим образом:

$$r' = r + \Delta r(\theta), \quad (4a)$$

$$\theta' = \theta + \arctg[\Delta r(\theta - \pi/2)/r]. \quad (4b)$$

Ошибка траектории вращения зависит от углового положения шпинделя и обусловлена неточностью его изготовления. Обычно такая ошибка для шпинделя на аэростатических подшипниках составляет менее 0,1 мкм. Форма кривой траектории вращения для используемых нами шпинделей достаточно стабильна и воспроизводима.

2.4. Ошибка позиционирования записывающего пятна в радиальном направлении. Платформа на аэростатических подшипниках перемещает оптическую головку записи и определяет положение записывающего пятна на подложке в радиальном направлении. Точность перемещения записывающего пятна по радиальной координате зависит от длительности переходного процесса системы радиального позиционирования, величины заданного перемещения, ошибки Аббе и т. п. В КЛЗС, как и в других генераторах изображений, может возникать масштабная ошибка, вызванная температурным расширением/сжатием механических узлов системы и изменением длины волны интерферометра в воздухе при изменении окружающих условий (температура, влажность и давление воздуха). Поэтому в процессе записи необходимо учитывать изменения окружающей среды (температуру и давление) для коррекции длины волны лазерного интерферометра или при обработке интерферограмм в процессе измерения асферического волнового фронта с учетом зарегистрированного поведения давления и температуры воздуха во время записи.

2.5. Ошибка угловой координаты. Ошибка определения угловой координаты свойственна только круговым системам записи и обусловлена вибрацией шпинделя, ошибкой датчика углового положения и т. п. Среднеквадратичная ошибка угловой координаты КЛЗС около 1 угл. с при скорости вращения в диапазоне 300–600 об/мин. Абсолютное значение линейной ошибки (в тангенциальном направлении) зависит от ошибки угловой координаты и уменьшается при приближении к центру вращения.

3. Измерение и регистрация специфических ошибок КЛЗС. Практически все специфические ошибки КЛЗС связаны тем или иным образом с взаимодействием подложки с регистрирующим материалом. Для измерения этих ошибок необходимо определить с высокой точностью положение оси вращения шпинделя относительно центра записывающего пятна.

3.1. Поиск оси вращения подложки. Известно несколько методов высокоточного нахождения оси вращения заготовки [11, 25]. Обычно эти методы основаны на замене заготовки на специальный оптический элемент с радиальной неоднородностью оптических свойств (отражающая подложка в виде клина, сферическая линза, решетка и т. п.), что делает невозможным нахождение оси вращения заготовки в процессе записи. Поэтому для измерения относительного положения оси вращения шпинделя и центра записывающего пятна в процессе экспонирования ДОЭ нами предложено записывать на поверхности заготовки ДОЭ небольшое кольцо (с радиусом 10–100 мкм) вокруг центра вращения и измерять его радиусы слева и справа от центра вращения с помощью фотоэлектрической системы сканирования [24]. Для осуществления этого метода заготовка с регистрирующим слоем для записи ДОЭ фиксируется на планшайбе шпинделя КЛЗС (см. рис. 1) и приводится во вращение. Записывающий лазерный пучок располагается вблизи центра вращения (определяется с точностью 1–2 мкм по обычному микрометрическому индикатору), и осуществляется сброс счетчика радиальной координаты. На вращающейся подложке на некотором расстоянии от центра

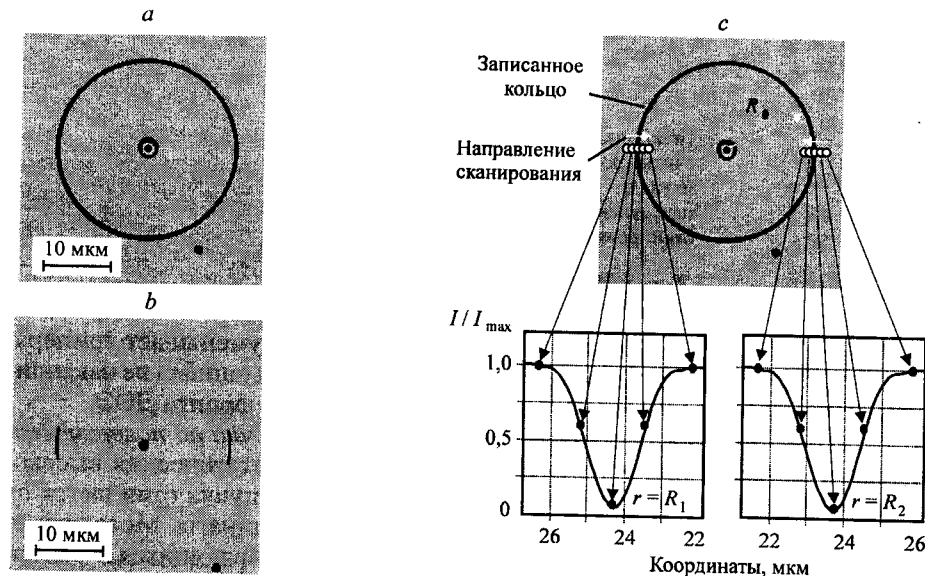


Рис. 2. Поиск центра вращения: микрофотографии кольца (а) и двух дуг (б); траектория сканирования лазерного пятна при поиске центра и типичные зависимости мощности отраженного считывающего пучка от координаты (с)

вращения (например, $R_0 = 10-50$ мкм) записывается кольцо с радиусом R_0 (рис. 2, а) или две небольшие дуги (рис. 2, б). Значение мощности записывающего пучка выбирается экспериментально для каждого типа пленки хрома с целью получения достаточного изменения отражения пленки (за счет окисления и плавления). Сканирующее фотоэлектрическое считывание осуществляется с помощью фотоприемника отраженного света (см. рис. 1), установленного на платформе линейного перемещения КЛЗС. В качестве пробного пучка используется тот же записывающий пучок, но с низкой мощностью. Считывающее пятно смещается на первый внешний радиус $r_1 = R_0 + d/2$ (d – диапазон сканирования), и осуществляется сканирование с шагом радиального перемещения 30–50 нм по направлению к центру. Траектория сканирования считывающего лазерного пятна и типичные распределения интенсивности (в относительных единицах) отраженного света от радиальной координаты показаны на рис. 2, с. Диапазон сканирования обычно составляет 3–6 мкм. Затем производится сканирование в диапазоне $\pm d/2$ относительно противоположного радиуса $-R_0$. После нахождения координат точек с минимальным отражением (R_1 и R_2) определяется ошибка координаты центра вращения через выражение $x_0 = (R_1 - R_2)/2$.

3.2. Долговременная стабильность положения начала радиальной координаты. Для регистрации температурного дрейфа узлов КЛЗС предложен автоматический поиск центра вращения в процессе записи с определенным шагом по радиальной координате. С этой целью процесс записи прерывается и осуществляется поиск координаты центра вращения. Текущая погрешность определения начала координат регистрируется для последующей математической обработки (коррекции) волнового фронта изготовленного ДОО. Может быть также использован периодический сброс счетчика радиальной координаты в точке найденного центра вращения при длительной

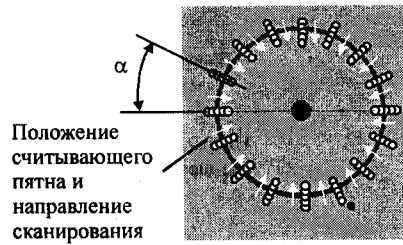


Рис. 3. Измерение траектории вращения

записи ДОЭ. Подобная процедура весьма эффективно уменьшает температурный дрейф реальной радиальной координаты, так как ошибка не накапливается. Однако это приводит к скачкам фазы волнового фронта ДОЭ.

3.3. *Измерение траектории движения лазерного пучка по поверхности заготовки.* Несмотря на применение в шпинделе аэростатических высокоточных подшипников траектория движения лазерного пучка отличается от круговой при неподвижной платформе линейной координаты. Метод измерения траектории вращения шпинделя основан на повторяющихся N раз измерениях диаметров небольшого кольца (см. разд. 3.1) при различных угловых положениях $\alpha = 360^\circ/N$, как это показано на рис. 3. Измерения могут быть выполнены как при неподвижном шпинделе (шпиндель с подложкой поворачивается вручную), так и при вращающемся на заданной рабочей скорости. Результаты таких реально выполненных измерений приводятся в разд. 5.1.

4. **Оптимизация стратегии записи осесимметричных ДОЭ.** Рассмотрим стратегию, обеспечивающую максимальную точность записи осесимметричных ДОЭ с помощью КЛЗС. Выбор данного типа ДОЭ обусловлен их широким применением для контроля асферической оптики. Ширина кольцевых зон (ширина экспонируемых колец) типичного ДОЭ может меняться от нескольких миллиметров до долей микрона. Запись таких зон выполняется повторяющимися проходами записывающего пятна с перекрытием формируемых дорожек. Возможно как спиральное (рис. 4, *a*), так и круговое (рис. 4, *b*) сканирование (а также их комбинация [11, 17]). Спиральное сканирование обеспечивает высокую скорость записи и отсутствие рывков подвижной линейной платформы. Однако из-за эксцентриситета этот метод может быть использован при изготовлении не очень точных ДОЭ и для записи средней области больших зон прецизионных ДОЭ. Поскольку качество ДОЭ

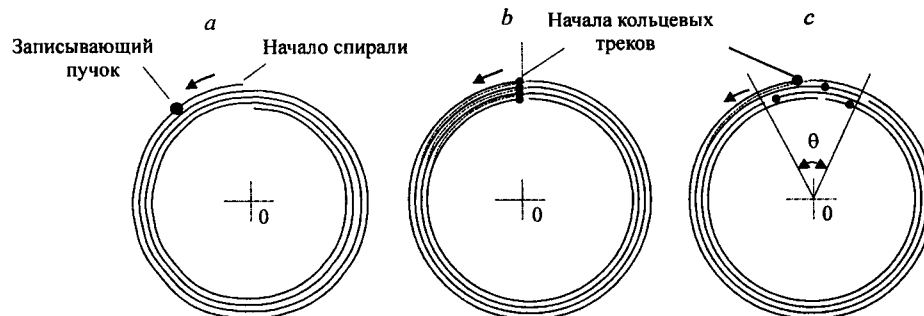


Рис. 4. Различные типы сканирования: спиральное (*a*), круговое (*b*) и круговое со случайным разбросом начала треков (*c*)

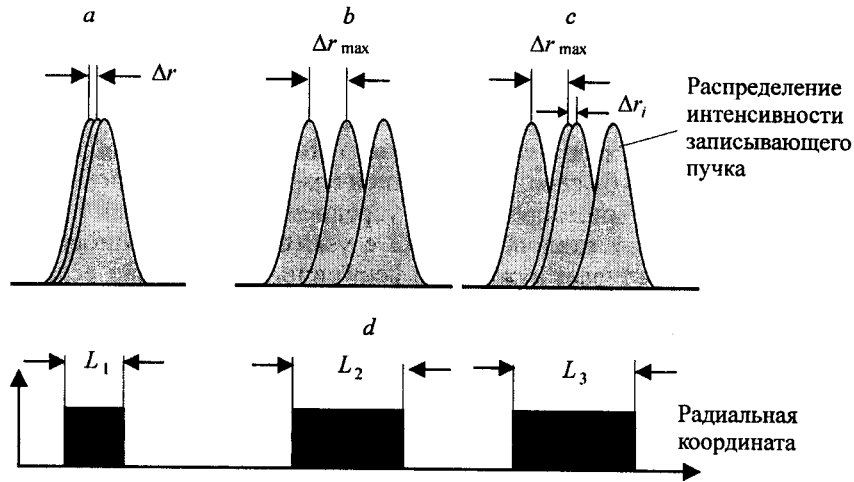


Рис. 5. Метод заполнения зон. Перекрытие кольцевых треков записывающего пучка (a – c) и записанные зоны в регистрирующем материале (d)

определяется точностью выполнения границ зон, то необходимо использовать только круговое сканирование. Радиальный шаг Δr кругового сканирования меняется исходя из требования симметричного заполнения зон, как это показано на рис. 5. Если ширина зоны L равна или несколько больше эффективной ширины записываемой дорожки D , то запись выполняется тремя ($N = 3$) проходами с шагом $\Delta r = (L - D)/2$ (см. рис. 5, a). Если радиальный шаг превышает значение $\Delta r_{\max} = nD$ (где n – коэффициент в пределах 0,5–0,8, постоянный по всей площади элемента), то запись зон осуществляется за четыре прохода (рис. 5, c) и более (при расширении зон). Таким образом, радиальный шаг для самых внешних проходов в зоне сохраняется равным Δr_{\max} , а между центральными проходами радиальный шаг Δr_i непрерывно меняется от нуля до Δr_{\max} с последующим увеличением ширины зон. Изменение радиального шага позволяет точно формировать границы зон без неоправданного уменьшения шага записи, свойственного алгоритму записи с постоянным шагом.

Запись узких зон несколькими проходами [17, 26] уменьшает влияние случайных ошибок позиционирования записывающего лазерного пятна, вибраций системы и переходных процессов каретки линейного перемещения. В то же время многопроходная методика уменьшает скорость записи ДОЭ. Уменьшение скорости записи может быть оценено на основе разбиения структуры кольцевого ДОЭ на три радиальных диапазона в зависимости от ширины дифракционных зон DZ : зоны с шириной $DZ \leq D$ (количество зон $N1$); $D + \Delta r_{\max} \geq DZ \geq D$ ($N2$); $DZ \geq D + \Delta r_{\max}$ ($N3$).

Данное разбиение позволяет сравнить продолжительность записи при изменении минимального количества проходов от 1 до 3. Общее количество оборотов для записи одного и того же элемента, но с разным минимальным количеством проходов будет следующим:

Минимальное количество проходов	Количество оборотов для записи
1	$2N1 + 4N2 + C(N3)$
2	$3N1 + 4N2 + C(N3)$
3	$4N1 + 6N2 + C(N3)$

Формулы получены с учетом того, что при перемещении лазерного пучка на другую радиальную координату теряется один оборот. Из этих формул следует, что для крайнего случая – записи аксикона с минимально возможной шириной зон $DZ \leq D$ – время записи для трех проходов увеличивается в 2 раза. Для зонных же пластинок Френеля, ширина зон которых увеличивается к центру очень быстро, время записи возрастает незначительно.

Преимущества многопроходного усреднения выявляются при изготовлении особо точных эталонных ДОЭ с узкими зонами. Многопроходное усреднение обеспечивает нужный эффект лишь в том случае, если ошибки, действительно, случайны. В других случаях эти улучшения менее заметны. В переходном процессе системы радиального позиционирования [22] КЛЗС наряду со случайными ошибками присутствует систематическая затухающая осциллирующая компонента, обусловленная собственной частотой системы позиционирования. Для эффективного устранения этой компоненты (особенно заметной в начале кольцевой дорожки) в КЛЗС предложено использовать произвольный разброс начала кольцевых треков (см. рис. 4, с). Разброс выполнялся в пределах угла $\theta = \pm 30 - 45^\circ$.

Разброс начала оборота также эффективно устраняет стыки (границы кольцевых дорожек) в начале и конце проходов. Рис. 6 показывает эффективность применения этого метода для устранения таких искажений структуры ДОЭ. Видно, что разброс существенно улучшает качество записи. Достоинства и недостатки элементов оптимизированной стратегии записи прецизионных ДОЭ (описанные в данном разделе) приведены в таблице.

Большинство предложенных методов повышения точности приводит к увеличению времени записи ДОЭ. Поэтому оптимальная стратегия записи должна быть основана на компромиссе между скоростью записи и точностью выполнения структуры ДОЭ.

5. Прогнозирование искажений волнового фронта ДОЭ. Основной источник искажений волнового фронта ДОЭ обусловлен ошибками изготовления структуры самого элемента. Ошибка волнового фронта W , вносимая ДОЭ и включающая любые неточности изготовления структуры, описывается уравнением (2). Это уравнение справедливо для однократного отражения или прохода световой волны через ДОЭ. Кроме того, все переменные в уравнении (2), за исключением ошибки структуры ζ , хорошо известны, поскольку

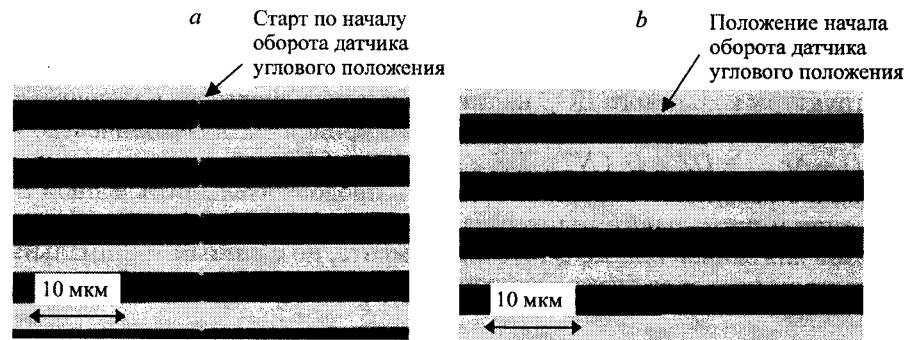


Рис. 6. Фрагменты зон осесимметричных ДОЭ, записанных без разброса (а) и с разбросом (б) начала кольцевых треков

Элементы оптимизированной стратегии записи

Метод	Достоинства	Недостатки
Круговое сканирование	Идеальная форма кольцевых зон	Увеличение времени записи примерно в 2 раза по сравнению со спиральным сканированием
Много проходов при записи узких зон (минимальное количество проходов 3)	Однородность ширины зоны	Уменьшение производительности до 2 раз
Симметричное заполнение зон	Однородность ширины зоны	Нет
Рассеяние начала кольцевых треков в угловом секторе θ°	Однородность по углу	Уменьшение производительности в среднем на $100(\theta/180^\circ) \%$

ку они определяются конструкцией ДООЭ. Поэтому, если ошибка структуры ζ может быть каким-либо образом определена в процессе изготовления, можно прогнозировать ошибки волнового фронта W .

Ошибка ζ структуры изготавливаемого ДООЭ определяется на основе двух процедур. Во-первых, для определения ошибки радиальной координаты используется периодический поиск центра в процессе записи. Во-вторых, измеряется траектория вращения шпинделя перед записью ДООЭ. Траектория вращения может измеряться как последовательным пошаговым поворотом шпинделя вручную, так и автоматически во время его вращения.

5.1. *Виды искажения волнового фронта.* В изготовленных с помощью КЛЗС дифракционных элементах часто наблюдаются спицеобразные искажения волнового фронта (угловые искажения), возникающие в результате вибраций шпинделя на аэростатических подшипниках. Угловые частоты этих искажений зависят от скорости вращения шпинделя и синхронны с ней. Например, при скорости вращения 600 об/мин в КЛЗС, работающей в ИТО, возникают характерные ошибки на угловых частотах $8/2\pi$ и $9/2\pi$ с амплитудой около 60 и 40 нм соответственно (рис. 7), а в КЛЗС ИАиЭ – на частоте $48/2\pi$ с амплитудой около 10 нм (см. разд. 6, рис. 12, *a, b*). Использование преобразования Фурье для анализа траектории позволяет получить амплитудный и фазовый спектры ее отклонения от идеального круга.

Осесимметричные искажения волнового фронта возникают из-за ошибки позиционирования записывающего пучка по радиальной координате и имеют две составляющие: смещение положения «нуля» счетчика радиальной координаты по отношению к центру вращения ζ_c и масштабную ошибку. Так как КЛЗС эксплуатируется в помещении со стабилизированными температурой и влажностью, то основной вклад в масштабную ошибку вносит изменение атмосферного давления. Длина волны корректируется с учетом регистрируемых параметров окружающего воздуха непосредственно в процессе записи и поэтому масштабная ошибка практически не возникает. Определяющим является вклад составляющей ζ_c . На рис. 8 представлен типичный пример ошибки радиальной координаты во время записи ДООЭ, измеренной путем периодического поиска центра вращения (см. разд. 3.2) без сброса «нуля» счетчика радиальной координаты. Резкие скачки зависимости

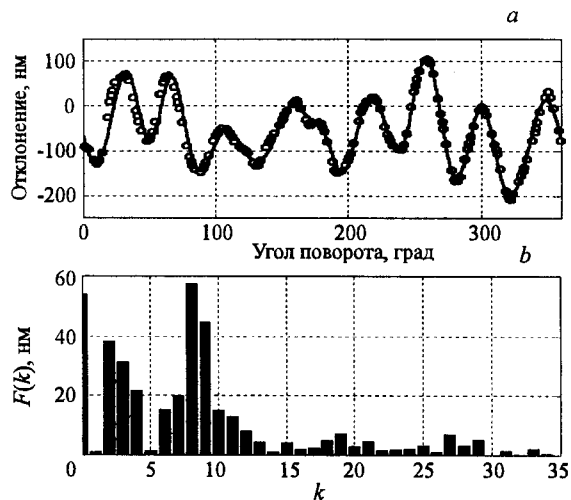


Рис. 7. Систематическая неосесимметричная ошибка микроструктуры: измеренная траектория (кружки) вращения шпинделя и восстановленная траектория (сплошная кривая) из фурье-спектра (а); амплитудный спектр фурье-преобразования измеренной траектории (k – номер гармоники скорости вращения (600 об/мин)) (b)

ошибки координаты от радиуса ДОЭ $\zeta_c(r)$ сглаживаются аппроксимацией рядом из полиномов Цернике.

Величина угловых ошибок определяется по измеренной траектории вращения шпинделя. Поскольку известен радиус измерительной окружности (см. рис. 2, а), то для ряда Фурье при $k = 0$ можно определить отклонение от идеальной окружности, которое в данном эксперименте составило 54 нм.

5.2. Сравнение прогнозируемых и измеренных искажений волнового фронта. Если в процессе записи регистрировались текущие ошибки, то можно использовать эти данные для калибровки оптических систем с ДОЭ. С этой целью была выполнена оценка как вращательно-симметричной, так и вращательно-несимметричной составляющих искажений волнового фронта. Подставляя зарегистрированную ошибку координаты $\zeta_c(r)$ и конструктивные данные ДОЭ (локальный период T) в уравнение (2), можно определить прогнозируемую ошибку волнового фронта, обусловленную неточностью структуры голограммы. На рис. 9 приведен пример прогнозируемой

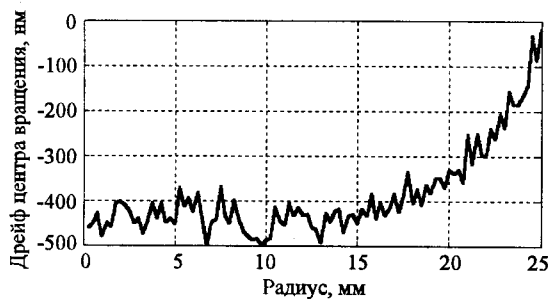


Рис. 8. Пример дрейфа центра вращения ζ_c , измеренного в процессе записи зонной пластинки

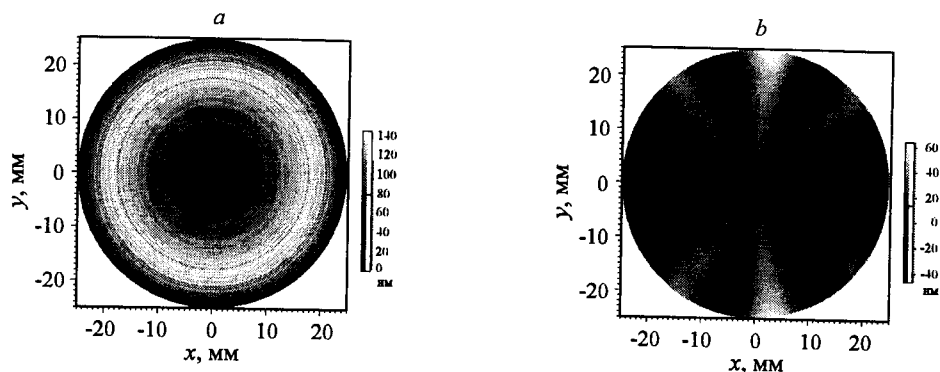


Рис. 9. Прогноз ошибки волнового фронта $W_{\text{по}}$: вращательно-симметричная (а) и вращательно-несимметричная (б) ошибки

ошибки волнового фронта $W_{\text{по}}$, рассчитанной по данным процесса записи зонной пластинки $f/1$.

На рис. 10 показаны фазовые карты волнового фронта зонной пластинки (ЗП) Френеля $f/1$, измеренного в отраженном свете. Она имела диаметр 50 мм и максимальную пространственную частоту $\nu_{\text{max}} = 769 \text{ мм}^{-1}$. Ошибки, вызванные наклоном и дефокусировкой, исключены из данных измерения. Наблюдаемый полный размах PV (peak-to-value) ошибки волнового фронта составляет 232 нм, среднеквадратичное значение равно 31 нм. Сравнение рис. 9 и 10 показывает хорошее соответствие между прогнозируемой и измеренной ошибками волнового фронта.

6. Изготовление ДОЭ с периодической коррекцией. Учет ошибок волнового фронта ДОЭ при обработке интерферограмм на основе данных, полученных в результате измерения и регистрации параметров записывающей системы и окружающей среды в процессе записи, эффективен лишь для простых оптических измерительных систем. В ряде случаев необходима гарантия максимально возможной точности изготовления ДОЭ. Для этого был исследован метод периодической коррекции радиальной координаты (см. разд. 3.2). Предложенный метод был апробирован экспериментально с помощью КЛЗС посредством записи отражающих ЗП с минимальным перио-

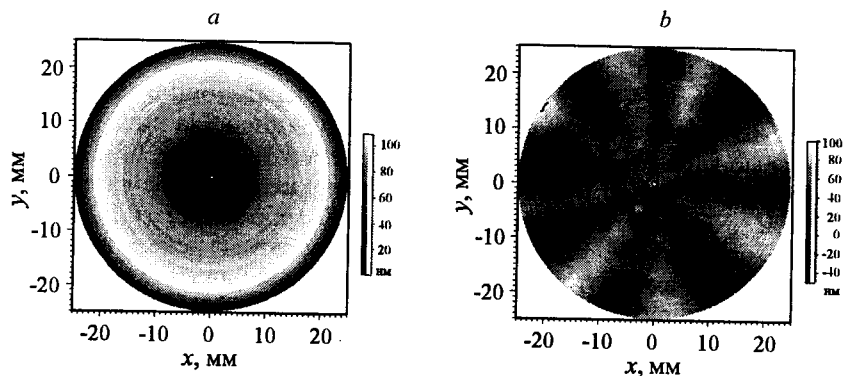


Рис. 10. Измеренная ошибка волнового фронта: вращательно-симметричная (а) и вращательно-несимметричная (б)

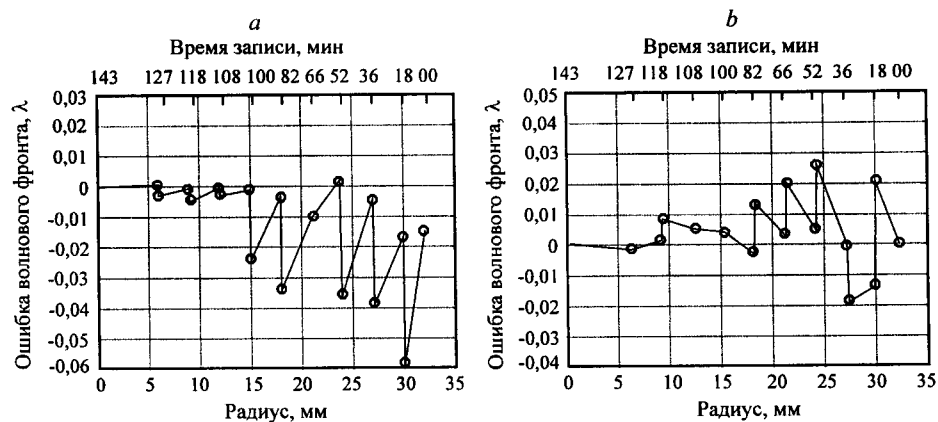


Рис. 11. Прогноз ошибки волнового фронта двух образцов ДОЭ (зонные пластинки с $f = 71$ мм, $D = 64$ мм): образец 1 ($t = 23,5$ °С, $P = 991$ мбар) (а); образец 2 ($t = 21,9$ °С, $P = 1000$ мбар) (б)

дом колец, равным $1,4$ мкм ($f = 71$ мм, $D = 64$ мм, $\lambda = 633$ нм, числовая апертура равна $0,45$). Были изготовлены две ЗП с одинаковыми оптическими параметрами. Запись проводилась на пленке хрома, нанесенной на высококачественные подложки (плоскостность $0,005\lambda$ – среднеквадратичное отклонение) из плавленого кварца. Время записи таких ЗП с использованием многопроходного алгоритма составляло около 140 мин. Период коррекции был выбран равным 3 мм (в среднем 18 мин записи), поскольку ожидаемый первоначальный дрейф координаты составлял примерно 100 нм/ч. В точках коррекции процесс записи прерывался, а фокусирующий объектив перемещался в начало радиальной координаты для поиска центра. В точке найденного центра вращения производилась коррекция путем сброса счетчика радиальной координаты, но только в случае, если обнаруженная ошибка превышала точность измерения. После сброса поиск центра вращения повторялся. На рис. 11 показаны фазовые искажения волнового фронта двух образцов изготовленных ЗП, рассчитанные на основе данных поиска центра вращения в точках коррекции. В местах, где производился сброс счетчика координаты, указаны два значения, соответствующие измерениям положения центра вращения до и после коррекции. Видно, что периодическая коррекция вносит высокочастотные ошибки в функцию волнового фронта, но весьма эффективно уменьшает дрейф центра (см. рис. 8).

Изготовленные ЗП были исследованы как отражающие элементы с помощью интерферометра Физо с фазовой модуляцией. На рис. 12 показаны полутоновые карты ошибки волнового фронта этих ЗП (а, б) и их сечения (с, д). Форма волнового фронта имеет среднеквадратичное отклонение от расчетной (сферической) формы, равное $0,008\lambda$ (образец 1) и $0,009\lambda$ (образец 2), с полным размахом ошибки $0,05\lambda$. Высокочастотные искажения волнового фронта обусловлены периодической коррекцией начала координат в процессе записи. Видно, что прогнозируемый (см. рис. 11) и измеренный (см. рис. 12) волновые фронты примерно одинаковы. Таким образом, можно сказать, что метод, основанный на периодической коррекции начала координат, позволяет повысить точность записи на КЛЗС.

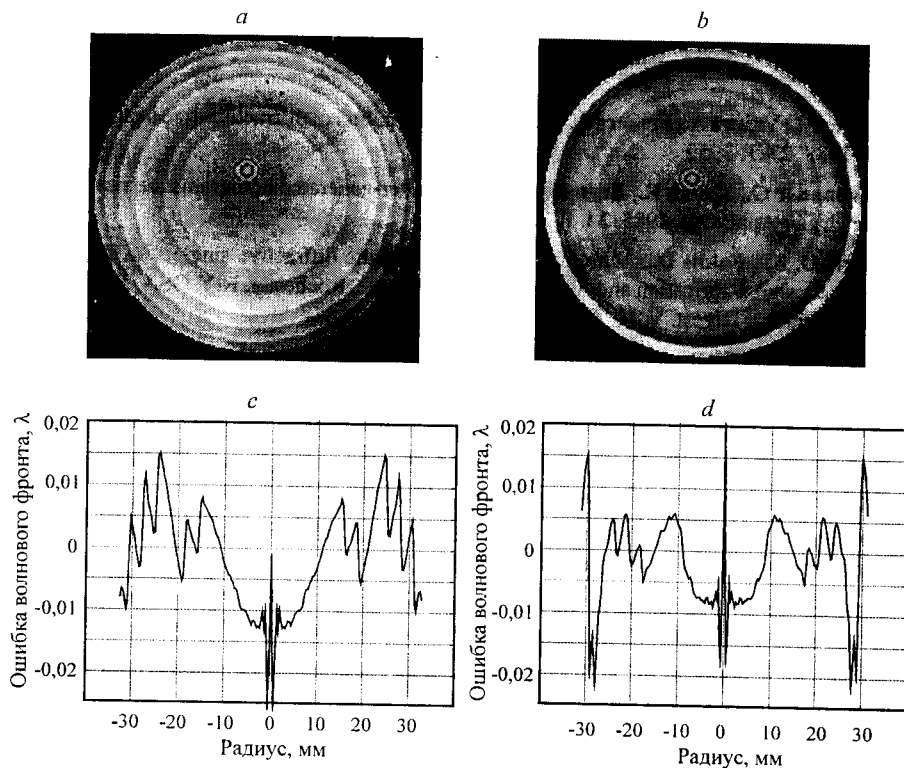


Рис. 12. Измеренные ошибки волнового фронта бинарных зонных пластинок: полутоновые карты (a, b); их поперечные сечения (c, d)

Заключение. КЛЗС является высокоточной системой, предназначенной для изготовления ДОЭ: решеток, зонных пластинок, компьютерно-синтезированных голограмм, оптических лимбов и т. п. Точность, пространственное разрешение и рабочее поле КЛЗС достаточны для решения широкого спектра задач в оптике, измерительной технике и лазерной технологии.

В отличие от записывающих устройств, работающих в прямоугольной системе координат, КЛЗС имеет некоторые специфические источники ошибок записи, влияющие на качество изготовленных ДОЭ. К таким ошибкам относятся: ошибка определения начала координат, ошибка измерения угловой координаты и ошибка траектории вращения шпинделя с закрепленной на нем подложкой. Показано, что ошибки записи сказываются на качестве волнового фронта ДОЭ, причем наибольший эффект имеет дрейф начала координат.

Оптимизация стратегии записи, а также измерение и регистрация параметров записывающей системы в процессе записи ДОЭ позволяют учесть или минимизировать влияние собственных ошибок КЛЗС и неправильного выбора оператором технологических режимов. Осесимметричные зонные пластинки являются наиболее подходящими элементами для выявления ошибок. Экспериментальное исследование волновых фронтов зонных пластинок диаметром 64 мм и числовой апертурой 0,45, изготовленных с периодической коррекцией, показало, что среднеквадратичная ошибка не превышает $0,01\lambda$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Turunen J., Vasara A., Friberg A.** Holographic generation of diffractive-free beams // *Appl. Opt.* 1988. **27**. P. 3959.
2. **Neugebauer G., Hauck R., Bryngdahl O.** Computer-generated holograms: carrier of polar geometry // *Appl. Opt.* 1985. **24**. P. 777.
3. **Morris G. M., Faklis D.** Achromatic and apochromatic diffractive singlets // *Diffractive Optics: Design, Fabrication and Application. Conference, Rochester, N.Y. OSA, JMC4-1/53.* 1994. Technical Digest. V. 11. P. 53.
4. **Burge J. H.** Application of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics // *Proc. SPIE.* 1995. **2576**. P. 258.
5. **Chang Y.-C., Burge J.** Error analysis for CGH // *Proc. SPIE.* 1999. **3782**. P. 358.
6. **Lukin A. V., Protasevich D. V., Znamenskii M. Yu.** Computer-generated hologram optical elements with high spatial frequency // *Proc. SPIE.* 1997. **3317**. P.185.
7. **Schwider J., Burov R.** Testing of aspherics by means of rotational-symmetric synthetic holograms // *Opt. Appl.* 1976. **VI**, N 3. P. 83.
8. **Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др.** Прецизионный фото-построитель для синтеза оптических элементов // *Автометрия.* 1981. № 3. С. 3.
9. **Haruna M., Takahashi M., Wakabayashi K. et. al.** Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses // *Appl. Opt.* 1990. **29**. P. 5120.
10. **Nomura T., Kamiya K., Miyashiro H.** An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe // *Precis. Eng.* 1994. **16**. P. 290.
11. **Goltsos W., Liu S.** Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication // *Proc. SPIE.* 1990. **1211**. P.137.
12. **Ogata S., Tada M., Yoneda M.** Electron-beam writing system and its application to large and high-density diffractive optic elements // *Appl. Opt.* 1994. **33**. P. 2032.
13. **Bowen J. P., Michaels R. L., Blough C. G.** Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation // *Appl. Opt.* 1997. **36**. P. 8970.
14. **Rasmussen E.** A new plotter for small structures – the Nanoplotter // *Risø National Laboratory, Optics and Fluid Dynamics Department Annual Progress Report for 2001.* P. 11; <http://www.risoe.dk/rispubl/ofd/ris-r-1314.htm>
15. **Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Korol'kov V. P. et. al.** Fabrication of diffractive optical elements by direct laser writing with circular scanning // *Proc. SPIE.* 1995. **2363**. P. 290.
16. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в пленках хрома // *Квант. электроника.* 1985. № 4. С. 755.
17. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Korolkov V. P. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // *Proc. SPIE.* 1997. **3010**. P. 168.
18. **Guhr J.** Test results of the laser writing system CLWS-300c // *Diffractive Optics' 97, Savonlinna, Finland. EOS Topical Meeting Digest Series.* 1997. **12**. P. 206.
19. **Перло П., Рипетто М., Синези С. и др.** Использование круговой лазерной записывающей системы для изготовления полутоновых шаблонов дифракционных оптических элементов на основе DLW glass пластинок // *Компьютерная оптика.* 1997. **17**. С. 85.
20. **Freimann R.** Aberrations of axially symmetric diffractive elements in relation to their fabrication inaccuracies // *Optik.* 2000. **111**, N. 11. P. 485.

перемещений с субнанометровым разрешением // Автометрия. 1998. № 2. С. 3.

23. **Korolkov V. P., Shimansky R., Poleshchuk A. G. et al.** Requirements and approaches to adapting laser writers for fabrication of gray-scale masks // Proc. SPIE. 2001. **4440**.
24. **Полещук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и измерения // Автометрия. 1997. № 6. С. 42.
25. **Milster T. D., Vernold C. L.** Technique for aligning optical and mechanical axes on a rotating linear grating // Opt. Eng. 1995. **34**, N 10. P. 2840.
26. **Hamaker W. H., Burns G., Buch P.** Optimizing the use of multipass printing to minimize printing errors in advanced laser reticle-writing systems // Proc. SPIE. 1995. **2621**. P. 319.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
Институт технической оптики
(Университет г. Штутгарта),
Университет Аризоны,
E-mail: Poleshchuk.A.G@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
12 марта 2002 г.*