

УДК 535.4 : 621.317

А. Г. Полещук, В. П. Коронкевич, В. П. Корольков,  
А. А. Харисов, В. В. Черкашин

(Новосибирск)

### СИНТЕЗ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ: ПОГРЕШНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ\*

Исследованы типичные источники погрешностей, возникающие при изготовлении дифракционных оптических элементов с помощью лазерных записывающих систем с круговым сканированием. Оценку погрешностей записи предложено осуществлять путем анализа волновых фронтов простейших тестовых дифракционных структур — линейных дифракционных решеток и круговых зонных пластинок. В качестве примера приведена оценка точности работы лазерной записывающей системы, разработанной в Институте автоматизации и электротехники СО РАН. Система предназначена для изготовления на подложках диаметром до 300 мм бинарных амплитудных, многоуровневых полутонковых и фазовых дифракционных элементов с характерными размерами микроструктуры менее 1 мкм. Интерферометрические измерения ошибок волнового фронта изготовленной бинарной зонной пластинки диаметром 58 мм с числовой апертурой 0,45 показали, что среднеквадратичная погрешность записи не превышает 0,04 мкм.

**Введение.** Прогресс дифракционной оптики определяется во многом технологией изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В настоящее время известно несколько основных способов изготовления ДОЭ: оптические (интерференционные или голографические) методы, алмазное точение, запись сканирующим пучком (электронным или лазерным). Оптические методы [1, 2] широко применялись на раннем этапе развития дифракционной оптики. Возможности этих методов ограничены в основном изготовлением различных круговых или линейных зонных пластинок и киноформов. Алмазное точение [3] — это хорошо зарекомендовавший себя и широко применяемый процесс для изготовления высокоточных оптических поверхностей в металлах, полимерах и кристаллах. Этот способ позволяет получать заданный фазовый профиль дифракционных элементов, однако его область применения ограничена изготовлением элементов с аксиальной симметрией. Сканирующие методы прямой лучевой записи [4—9] являются наиболее универсальными. Эти методы основаны на сканировании сфокусированным амплитудно-модулированным лазерным или электронным пучком поверхности подложки, покрытой регистрирующим слоем. Записывающий пучок перемещается по заданным траекториям. Эти траектории являются прямыми линиями (для прямоугольной или  $X—Y$ -системы координат) или кругами и спиралями (для полярной системы координат).

Электронно-лучевые или лазерные устройства записи, работающие в прямоугольной системе координат, широко используются для изготовления ДОЭ. Дифракционная структура представляется набором элементарных изображений — трапеций или прямоугольников, ориентированных вдоль двух фиксированных ортогональных осей [8]. Это приводит к рассеянию света на углах

\* Материалы данной статьи доложены на международной конференции ДОО'97, Финляндия, Савонлинна, июль 1997 г.

прямоугольников и появлению дополнительного шума в формируемом изображении. Существует ряд типов ДОЭ, для которых предпочтительным является сканирование в полярной системе координат. К ним относится основная часть фокусирующей оптики, синтезированные голограммы [12], формователи бездифракционных пучков [11], корректоры волновых фронтов [10] и т. д. 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, при общих размерах в несколько сотен миллиметров [13—15]. Дифракционные элементы такого типа могут быть изготовлены только с помощью устройств, использующих для записи полярную систему координат. Поэтому при выборе метода изготовления ДОЭ необходимо учитывать специфику их применения. Точность формирования дифракционной структуры является определяющей при изготовлении ДОЭ для аттестации классических оптических элементов и систем [16].

В настоящей работе приведено краткое описание разработанной в ИАиЭ СО РАН круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) и рассмотрены особенности метода записи с адресацией лазерного пучка в полярной системе координат. Проведен анализ наиболее типичных источников ошибок записи: погрешностей угловой и радиальной координаты, начала координат, погрешностей траектории вращения и автоматической фокусировки. Цель исследования — установить взаимосвязь ошибок записи и погрешностей волнового фронта дифракционных элементов, изготовленных с помощью КЛЗС. Представлены характеристики этих ДОЭ — зонных пластинок и линейных решеток, а также рассмотрены методы измерения ошибок изготовления.

1. **Лазерная запись в полярной системе координат.** КЛЗС [9] состоит из четырех основных частей: шпинделя на аэростатических опорах с приводом вращения от электрического двигателя, платформы линейного перемещения, лазерной системы экспонирования и управляющих блоков. Функциональная схема устройства приведена на рис. 1, а основные технические характеристики — в табл. 1.

Подложка со светочувствительным материалом крепится на столе, установленном на торце шпинделя, вращающегося на аэростатических опорах. На оси шпинделя установлен датчик измерения угла поворота (среднеквадратичная погрешность около 1 угл. с). Датчик формирует электрические импульсы, предназначенные для стабилизации скорости вращения шпинделя и синхронизации модуляции лазерного пучка с угловым положением подложки. Лазерное излучение (в КЛЗС используется аргоновый лазер с выходной мощностью 100—700 мВт) модулируется акустооптическим модулятором (АОМ) и направляется к фокусирующему объективу (числовая апертура  $NA = 0,65$ ), расположенному на платформе линейного перемещения. Объектив формирует записывающее световое пятно диаметром около 0,8 мкм на поверхности подложки.

Система автоматической фокусировки с электродинамическим исполнительным элементом удерживает записывающее пятно на поверхности подложки во время записи. Платформа на аэростатических опорах с расположенной на ней системой экспонирования перемещается линейным двигателем. Перемещение платформы измеряется лазерным интерферометром. Диапазон перемещений платформы 250 мм, среднеквадратичная точность позиционирования 100 нм.

Во время записи компьютер управляет мощностью лазерного пучка (1024 уровня). Адаптер модулятора, установленный в управляющем компьютере (IBM PC), формирует цифровой сигнал импульсной модуляции для быстрого включения и выключения АОМ.

Дифракционные элементы с осевой симметрией записываются последовательным экспонированием внутренней и внешней границы дифракционной зоны путем кругового сканирования и последующим заполнением внутренней части зоны сканированием по спирали. Для записи ДОЭ с произвольной структурой используется программное обеспечение, преобразующее прямоуголь-

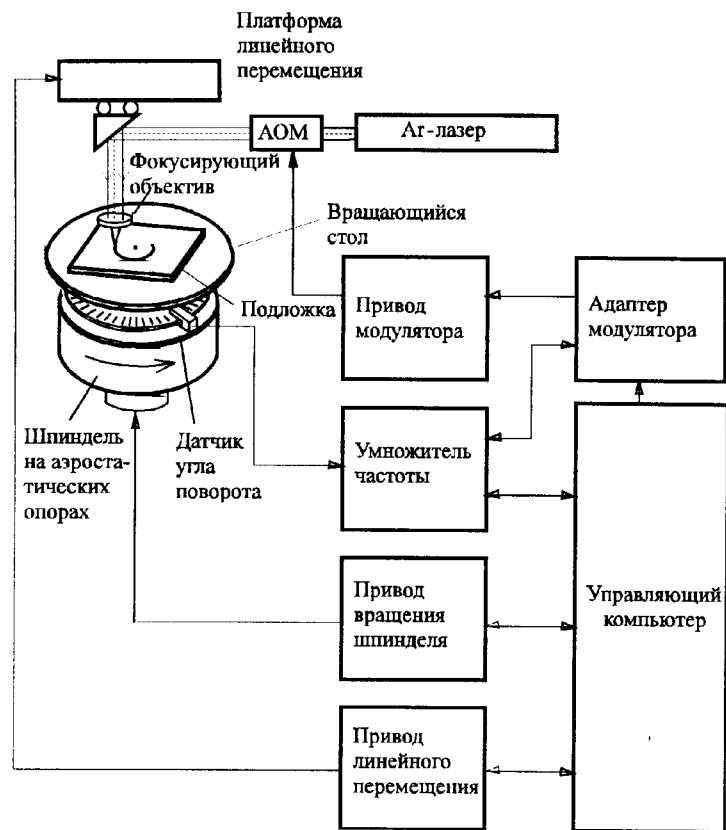


Рис. 1. Функциональная схема круговой лазерной записывающей системы

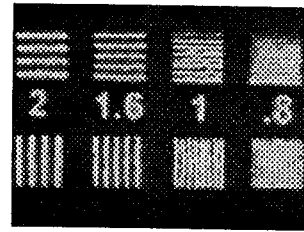
Таблица 1

Характеристики круговой лазерной записывающей системы

Максимальный диаметр области записи	300 мм
Толщина подложки	1,5—30 мм
Минимальная ширина записываемой линии	0,6—1,2 мкм (определяется величиной экспозиции)
Скорость вращения	150—900 об./мин
Точность перемещения по радиусу	0,1 мкм (среднеквадратичное значение)
Точность определения угла поворота	1 угл. с (среднеквадратичное значение)
Число синхроимпульсов углового раstra	1602000 (600 об./мин) 1134000 (850 об./мин)
Тактовая частота записи	16 МГц
Длина волны записывающего лазера	457—514 нм
Методы записи	Термохимическая технология записи на пленках хрома; полупроводниковая технология прямой записи на пленках аморфного кремния; технология прямого формирования микро-рельефа в пленках фоторезистов

Рис. 2. Микрофотография тестового изображения, записанного в пленке хрома (толщина 80 нм) по термохимической технологии.

Период линий 2; 1,6; 1 и 0,8 мкм



ную систему координат (в которой был рассчитан ДОЭ) в полярную, для модуляции записывающего лазерного пучка в зависимости от углового положения. Пространственное разрешение записываемых структур превышает  $1000 \text{ мм}^{-1}$  при записи как кольцевых структур, так и произвольных микроизображений. Пример микроизображения линейной структуры (тест пространственного разрешения), изготовленной на КЛЗС, показан на рис. 2.

2. Погрешности круговой лазерной записывающей системы. Задачей изготовления ДОЭ является запись бинарных (т. е. имеющих две градации пропускания или фазы), рельефных или полутоновых структур площадью до  $(1-3) \times 10^4 \text{ мм}^2$  с минимальными размерами структуры менее 1 мкм и точностью границ 0,1—0,2 мкм по всей поверхности элемента. 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  $P_i(r_i, \varphi_i)$ , где  $r_i$  — радиус записи (расстояние от оси вращения шпинделя до центра лазерного записывающего пятна);  $\varphi_i$  — угловая координата записи (определяется как разность между началом угловой координаты ( $\varphi = 0$ ) и текущим угловым положением вращающегося стола). Процесс записи вносит погрешности в структуру ДОЭ. 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,  $\varepsilon_i = P_i(r_i, \varphi_i) - P'_i(r'_i, \varphi'_i)$  — погрешность координаты записи;
- 2) разница между расчетным и реально записанным размером и формой элементарной ячейки (погрешность размера).

Абсолютная погрешность координаты  $\varepsilon_i$  зависит от точности перемещения лазерного пучка относительно подложки. Эта погрешность приводит к появлению дополнительного сдвига фазы волнового фронта светового потока, прошедшего через изготовленный ДОЭ. Фазовый сдвиг аналогичен сдвигу фазы, обусловленному нарушением периодичности штрихов в обычной дифракционной решетке и вызывающему появление паразитных порядков дифракции, называемых «духами». Фазовый сдвиг (в долях длины волны света  $\lambda$ ) может быть определен как

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

где  $m$  — порядок дифракции;  $T$  — период дифракционной структуры в данной области ДОЭ;  $\varepsilon_i$  — погрешность координаты записи в направлении, перпендикулярном полосам ДОЭ.

Погрешность 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.

3. Анализ ошибок записи. Рассмотрим специфические для КЛЗС источники погрешностей, приводящие к сдвигу координаты записи. Совокупная погрешность записи определяется в основном следующим:

- 1) ошибкой фиксации начала координат, вызванной погрешностью совмещения центра полярной системы координат, используемой при расчете ДОЭ, с осью вращения шпинделя устройства записи;
- 2) погрешностью угловой координаты, вызванной ошибками измерения текущего углового положения вращающегося стола;

- 3) погрешностью траектории вращения, вызванной отклонением траектории движения записывающего луча от идеального круга;
- 4) погрешностью перемещения записывающего пятна в радиальном направлении;
- 5) погрешностью, вносимой в координату записывающего пятна системой автоматической фокусировки.

3.1. *Ошибка фиксации начала координат.* Началом полярной системы координат ( $r = 0$ ) в КЛЗС является ось вращения стола с подложкой, покрытой светочувствительным материалом. Однако определение положения оси вращения с высокой точностью — серьезная проблема. Поэтому всегда возможна ошибка совмещения центра полярной системы координат, используемой при расчете ДОЭ, с осью вращения шпинделя устройства записи. На рис. 3 приведены траектории записывающего лазерного луча на подложке при наличии ошибки начала координат. Линия 1 — след записывающего пятна на неподвижной подложке при перемещении линейной платформы, круг 2 с радиусом  $r'$  — след записывающего пятна при вращающейся подложке, но неподвижной платформе. Расстояния  $y_0$  и  $x_0$  (в прямоугольной системе координат с началом в точке  $O$ ) от точки  $O_1$ , которая является началом отсчета лазерного интерферометра, до центра  $O$  вращения подложки вносят ошибку в координату записываемой точки. Реальная полярная координата записываемой точки будет  $P'(r', \varphi')$ . Радиус  $r' = r + \Delta r$  определяется как

$$r' = \sqrt{(r + x_0)^2 + y_0^2} = r + \Delta r \approx r + x_0 + y_0^2/2r \quad (2a)$$

и полярный угол  $\varphi' = \varphi + \Delta\varphi$  как

$$\varphi' = \varphi + \operatorname{arctg} \left( \frac{y_0}{r + x_0} \right). \quad (2б)$$

Ошибка фиксации начала координат (расстояние между точками  $O$  и  $O_1$  на рис. 3) измеряется фотоэлектрической сканирующей системой КЛЗС, и по формулам (2) вычисляется истинное положение записывающего пятна. Радиальную ошибку  $x_0$  можно минимизировать путем перемещения платформы. На практике ошибка  $y_0$  остается, так как точность юстировки записывающего пятна в этом направлении ограничена. Таким образом, ошибка фиксации начала координат вызывает изменение координат  $(r, \varphi)$  всех точек записываемого ДОЭ. Следует отметить, что аналогичная ошибка при записи в прямоугольной системе координат вызывает сдвиг без искажений всего изображения как целого.

3.2. *Погрешность угловой координаты.* Погрешность угловой координаты является специфической для круговой записывающей системы. Оптико-

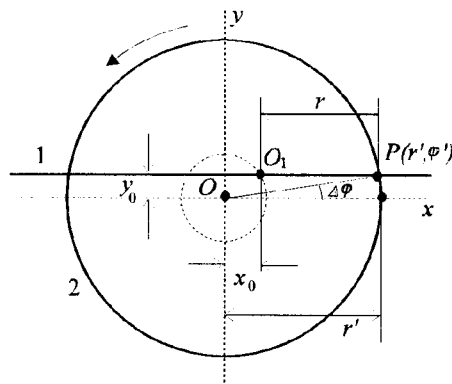


Рис. 3. Траектории записывающего лазерного луча на подложке в окрестности оси вращения

электронный датчик угла поворота шпинделя КЛЗС (см. рис. 1) формирует электрические импульсы, следующие через каждые  $0,02^\circ$ . Умножитель частоты следования импульсов, выполненный на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), увеличивает угловое разрешение в 50—100 раз вплоть до  $\delta\varphi = 0,8—1$  угл. с. Текущая угловая координата  $\varphi_i$  записи определяется путем подсчета числа  $n_i$  выходных импульсов от этой системы как разница между началом угловой координаты ( $\varphi = 0$ ) и текущим угловым положением вращающегося стола:

$$\varphi = n_i \delta\varphi, \quad (3)$$

где  $\delta\varphi = 360^\circ/N$  — величина одной дискреты угловой координаты;  $N$  — количество импульсов на один оборот шпинделя на выходе умножителя частоты угловой координаты. Погрешность угловой координаты определяется следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi'. \quad (4)$$

Источниками ошибок являются неоднородности интервалов  $\delta\varphi$ , вызванные вибрацией шпинделя, электрическими шумами, вносимыми системой ФАПЧ, погрешностью датчика угла поворота и т. д. Погрешность угловой координаты имеет периодическую составляющую (период — угол поворота шпинделя на  $360^\circ$ ) и может быть представлена рядом Фурье:

$$\Delta\varphi(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{-n\omega_0\varphi}, \quad (5)$$

где  $C_n$  — коэффициенты ряда Фурье;  $n$  — номер гармоники;  $\omega_0 = 1$ .

Ошибка в центрировании угловой шкалы датчика приводит к появлению первой гармоники функции распределения погрешности угловой координаты. Эта зависимость может быть представлена как

$$\Delta\varphi(\varphi) = C_0 + C_1 \cos(\omega_0\varphi). \quad (6)$$

Экспериментальные исследования КЛЗС показали, что типичная средне-квадратичная величина погрешности угловой координаты не превышает 1 угл. с (скорость вращения 5 об./с). Абсолютная величина погрешности угловой координаты связана с линейной ошибкой  $E_l$  (в тангенциальном направлении) следующим образом:

$$E_l = r\Delta\varphi, \quad (7)$$

где  $r$  — радиус записи.

Это означает, что линейная ошибка на радиусе записи 50 мм не превышает 0,25 мкм (для  $\delta\varphi = 0,8—1$  угл. с) и линейно уменьшается к центру.

Типичный пример распределения угловой погрешности оптической шкалы, имеющей 36000 штрихов (диаметр около 150 мм), показан на рис. 4 [15]. Шкала изготовлена на подложке с хромовым покрытием по термохимической технологии с помощью КЛЗС типа CLWS-300с. Хорошо видно несколько первых гармоник распределения ошибок угловой координаты.

**3.3. Погрешность траектории вращения.** Погрешность траектории вращения шпинделя (рис. 5, *a, b*) — отклонение траектории (кривая 2) движения некоторой точки вращающегося стола от идеального круга (кривая 1). Эта погрешность складывается из девиации центра вращения шпинделя (эксцентриситет) и углового отклонения оси вращения (бисение оси вращения). Погрешность траектории вращения зависит от углового положения и вызвана неточностью изготовления деталей аэростатического шпинделя. Типичная величина этой погрешности для шпинделя на аэростатических опорах обычно не превышает 0,1 мкм. На рис. 5, *b* показан реальный пример траектории движения точки на вращающемся столе КЛЗС. Кривая 2 получена путем

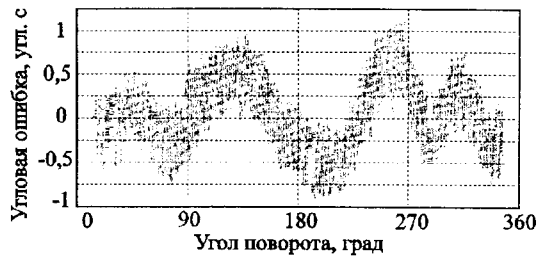


Рис. 4. Типичная функция распределения погрешностей угловой координаты КЛЗС [15]

измерения (через каждые  $1,8^\circ$ ) 100 диаметров круга, записанного на радиусе 100 мкм. Форма кривой  $\Delta r(\varphi)$  достаточно стабильна и воспроизводима. Этот тип погрешности приводит к искажению координат записи. Реальная координата записи будет (при  $r \gg \Delta r$ ) следующей:

$$r' = r + \Delta r(\varphi), \quad (8a)$$

$$\varphi' = \varphi + \arctg[\Delta r(\varphi - \pi/2)/r]. \quad (8б)$$

3.4. Погрешность перемещения записывающего пятна. В идеальном случае записывающее пятно должно перемещаться строго вдоль радиуса вращающейся подложки. Любое отклонение от прямолинейного перемещения приводит к появлению погрешности координаты записи. Существует два основных вида погрешностей, вносимых платформой линейного перемещения, — это погрешность перемещения записывающего пятна вдоль радиальной координаты и угловая погрешность. Платформа на аэростатических опорах перемещает фокусирующую оптику и определяет положение записывающего пятна на подложке в радиальном направлении. Контроль перемещения платформы осуществляется лазерным интерферометром (дискретность  $\lambda/64 \approx 0,01$  мкм). Точность перемещения платформы на заданную координату определяется временем переходного процесса, дискретностью и временной стабильностью интерферометра, ошибками Аббе и т. д. Время перемещения платформы на небольшое расстояние (1—5 мкм) с точностью 0,1 мкм составляет около 0,05 с, и этот фактор определяет скорость записи. Перемещение платформы сопровождается ее наклонами по всем координатам. Наибольшую погрешность вносит угловое отклонение  $\theta_z$  в плоскости вращающегося стола, в то

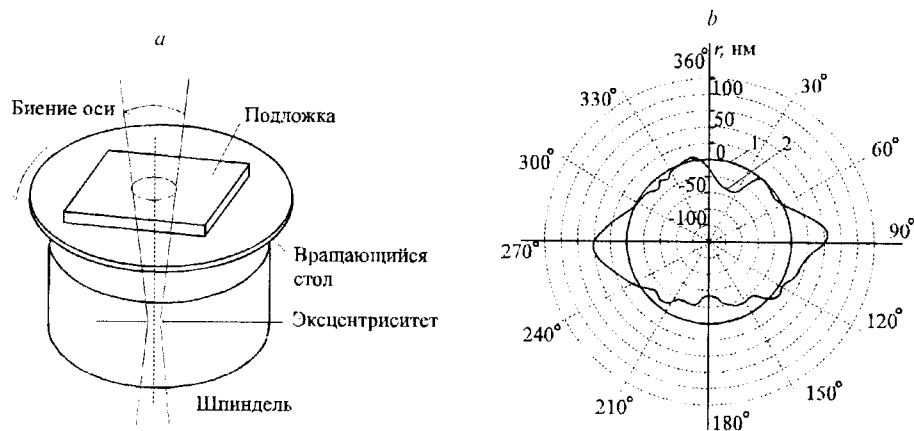


Рис. 5. Биение оси вращения шпинделя (а) и измеренное отклонение траектории движения некоторой точки вращающегося стола (кривая 2) от идеального круга (1) (b)

время как вклад остальных угловых отклонений минимизируется с уменьшением длин консолей и использованием автоматической фокусировки. Смещение  $H_z$  записывающего пятна в горизонтальной плоскости приводит к появлению погрешности угловой координаты записи:

$$\Delta\varphi = \text{arctg}(H_z/r), \quad (9)$$

где  $H_z = \int_0^r \theta_z(r)dr$ . Из выражения (9) следует, что угловая погрешность перемещения платформы растет с уменьшением радиуса записи  $r$ .

3.5. *Погрешности координаты записи, вносимые системой автоматической фокусировки.* Запись сфокусированным лазерным лучом требует точного контроля положения плоскости фокусировки, которая должна быть совмещена с плоскостью светочувствительного слоя, нанесенного на поверхность подложки. Задача системы автоматической фокусировки — постоянное удержание сфокусированного записывающего пятна на поверхности вращающейся подложки. Система автоматической фокусировки перемещает фокусирующий объектив вслед за поверхностью подложки в процессе записи. Погрешность фокусировки, превышающая  $\pm 0,2$  мкм (объектив с числовой апертурой 0,65), приводит к изменению размеров и формы записывающего пятна и, следовательно, параметров записи, а наклон оси объектива — к появлению погрешности координаты записи, как показано на рис. 6. Наклон оси объектива на угол  $\alpha$ , в плоскости  $OO'C$  (радиальная плоскость) приводит к появлению ошибки радиальной координаты  $\Delta r_a = r - r'$ , наклон оси объектива  $\alpha_\varphi$  в плоскости, проходящей через линию  $AC$  и ортогональную плоскости  $OO'C$  (тангенциальная плоскость), — к появлению угловой ошибки  $\Delta\varphi_a$ . Используя обозначения рис. 6, можно показать (при  $d \ll r$ ), что

$$\Delta r_a = \alpha_r d + d^2/2r, \quad (10a)$$

$$\Delta\varphi_a = \text{arctg}(\alpha_\varphi d/r), \quad (10б)$$

где  $r$  — радиус записи;  $d$  — амплитуда вертикальных биений подложки в точке фокусировки. Так, если наклон оси фокусирующего объектива равен  $\alpha_r = 1^\circ$ , то при  $d = 20$  мкм и  $r = 50$  мм погрешность полярной координаты записи составит:  $\Delta r_a \approx 0,3$  мкм и  $\Delta\varphi_a \approx 1,2$  угл. с.

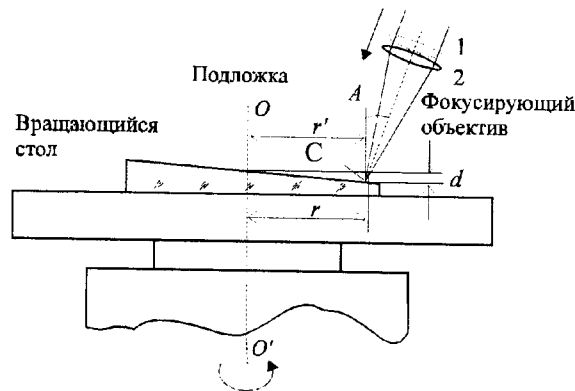


Рис. 6. Погрешности координаты записывающего пучка, вносимые системой автоматической фокусировки



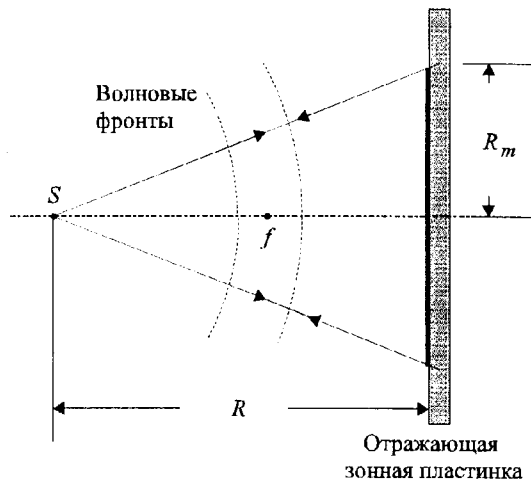


Рис. 7. Тестовая отражающая зонная пластинка:

$R$  — радиус кривизны волнового фронта,  $R_m$  — максимальный радиус зонной пластинки,  $f$  — точка фокуса

4. Точность изготовления ДОЭ в полярной системе координат. Концентрические кольца и дуги являются идеальными структурами для записи в полярной системе координат, 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 (набор прямых линий).

4.1. Круговые зонные пластинки. Фазовая функция полностью скорректированной осевой отражающей зонной пластинки (ЗП) для сопряжения точечного источника света  $S$  с этой же самой точкой (рис. 7) может быть записана как

$$\psi(r) = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \sqrt{R^2 + r^2} - R \right), \quad (11)$$

где  $R = 2f$  — радиус кривизны волнового фронта;  $\lambda$  — длина волны.

Погрешности изготовления дифракционной структуры приводят к появлению aberrаций волнового фронта. Фазовая функция (на основании выражений (2а) и (11)) зонной пластинки с погрешностями изготовления (ошибка фиксации начала координат) может быть записана как

$$\psi'(r) = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \sqrt{R^2 + (r + x_0)^2 + y_0^2} - R \right). \quad (12)$$

Функцию aberrации волнового фронта (при  $x_0 \ll r$ ) можно записать таким образом:

$$W(r) = \psi(r) - \psi'(r) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{rx_0}{\sqrt{R^2 + r^2}}. \quad (13)$$

Примеры волновых aberrаций (численное моделирование с использованием выражений (1) и (13)) круговой зонной пластинки, обусловленных погрешностями изготовления, показаны на рис. 8. Видно, что погрешность начала координат вносит коническую компоненту в волновой фронт (рис. 8, а).

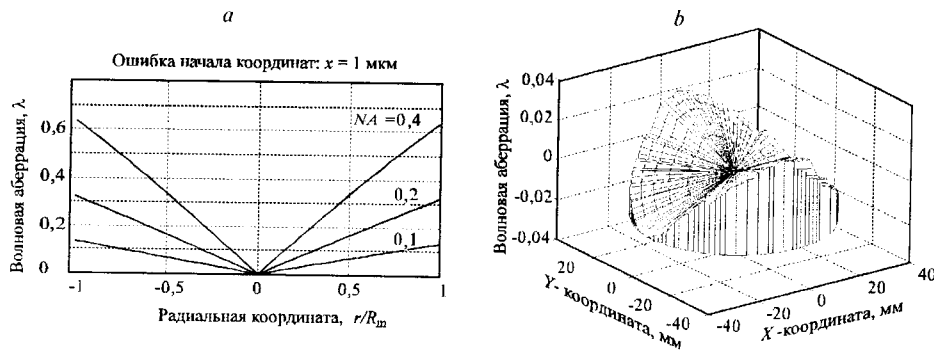


Рис. 8. Аберрации волнового фронта тестовой зонной пластинки, вызванные погрешностями изготовления.

Погрешность фиксации начала координат (а) — волновые аберрации тестовой зонной пластинки для нескольких величин числовой апертуры; погрешность траектории вращения (b) — карта волнового фронта зонной пластинки, изготовленной на КЛЗС с погрешностью вращения шпинделя, приведенной на рис. 5, b

Погрешности записи, вносимые неидеальностью траектории вращения шпинделя и системой автоматической фокусировки, не имеют осевой симметрии. Зонная пластинка представляет собой аксиально симметричную структуру, поэтому угловые ошибки (см. выражение (8б)) не влияют на форму волнового фронта. Пример карты искаженного волнового фронта при наличии ошибки вращения показан на рис. 8, b. На этом рисунке приведена рассчитанная с помощью выражений (1) и (8) карта волнового фронта зонной пластинки со следующими параметрами: радиусом кривизны волнового фронта  $R = 16,2$  мм, радиусом  $R_m = 3,3$  мм, длиной волны  $\lambda = 0,633$  мкм и отклонением траектории движения записывающего пучка от круга в соответствии с рис. 5, b (кривая 2). Видно, что отклонение траектории вращения шпинделя КЛЗС от круга на величину до 0,1 мкм вносит в волновой фронт ЗП с числовой апертурой 0,4 волновые аберрации порядка  $\lambda/20$ , что является приемлемым для большинства применений.

4.2. *Линейные дифракционные решетки.* Линейные дифракционные структуры записываются посредством амплитудной модуляции лазерного пучка синхронно с вращением подложки. Если центр полярной системы совпадает с началом прямоугольной системы координат, то угловое положение  $\varphi_i$  записи  $i$ -й точки  $j$ -й линии на радиусе  $r_j$  определяется как

$$\varphi_i = \arccos(x_i/r_i), \quad (14)$$

где  $x_i = jT$  — координата  $j$ -й линии решетки в прямоугольной системе координат;  $T$  — период решетки.

Погрешности изготовления  $\epsilon_i = x'_i - x_i$ , где  $x_i = r_i \cos(\varphi_i)$ , вызывают искажение формы штрихов решетки и, следовательно, аберрации волнового фронта, дифрагировавшего на этой решетке. Волновые аберрации, вызванные искажениями формы штрихов решетки в окрестности  $i$ -й точки, могут быть оценены с помощью выражения (1). Форма штрихов линейной решетки зависит от всех типов погрешностей изготовления. На рис. 9 показан ряд интерферограмм (компьютерное моделирование с использованием выражения (14)) волнового фронта, дифрагированного на линейной решетке с внесенной погрешностью фиксации начала координат. Видно, что наибольшие искажения волнового фронта имеют место в окрестностях начала координат (центр интерферограмм).

Различные типы погрешностей изготовления влияют на вид картины волнового фронта по-разному. Карты волновых фронтов (первый порядок дифракции) для различных типов ошибок изготовления показаны на рис. 10. Хорошо видно, что максимальные искажения волнового фронта наблюдаются

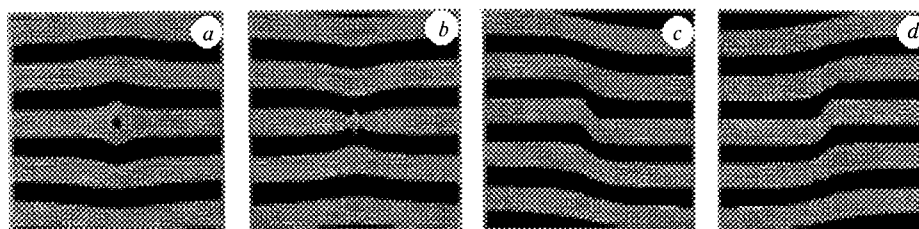


Рис. 9. Интерферограммы волновых фронтов, дифрагированных на линейных решетках, изготовленных с погрешностями фиксации начала координат:  
*a, b* — соответственно ошибки  $0,5T$  и  $-0,5T$  поперек штрихов решетки; *c, d* — соответственно ошибки  $0,5T$  и  $-0,5T$  вдоль штрихов решетки

в начале координат (в окрестностях центра вращения). Следовательно, для уменьшения искажений волнового фронта необходимо записывать ДОЭ с произвольной геометрией вдали от центра вращения.

**5. Методы измерения погрешностей изготовления.** Возможны два основных способа измерения погрешностей изготовления дифракционных структур:

1) сертификация КЛЗС с помощью внешних устройств, таких как аттестованный внешний лазерный интерферометр (проверка линейной координаты), аттестованная многогранная призма с фотоэлектрическим автоколлиматором (проверка угловой координаты), сканирующий микроскоп (измерение ошибки начала координат) и т. д.;

2) комплексный метод, основанный на анализе волнового фронта тестовых ДОЭ, изготовленных на проверяемой КЛЗС. С нашей точки зрения наиболее приемлемым является второй способ.

**5.1. Тестирование ДОЭ.** Погрешности изготовления, как было показано выше, существенно влияют на качество волнового фронта ДОЭ. Какие типы

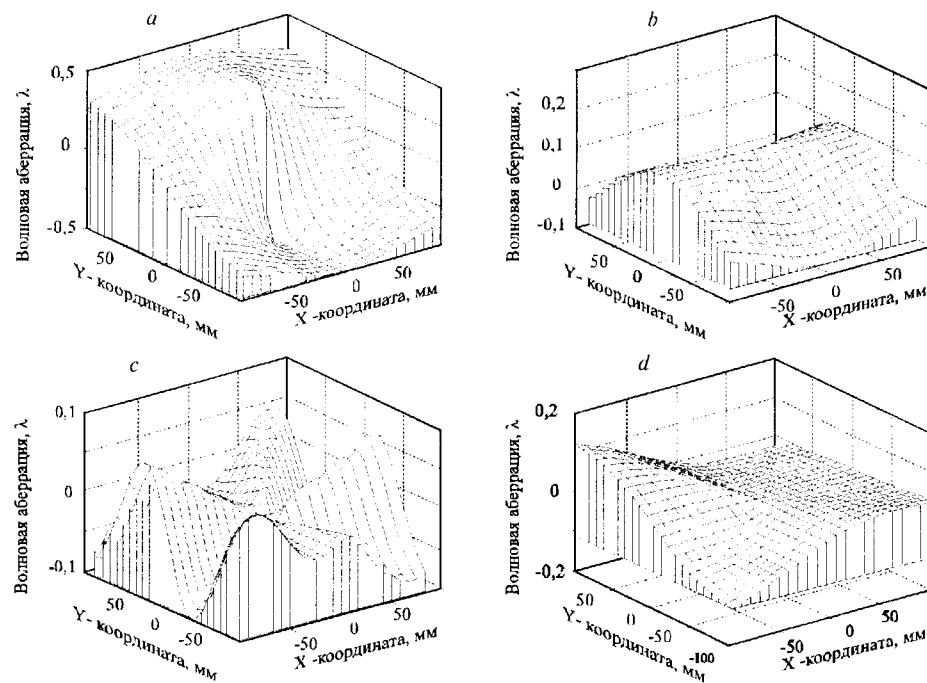


Рис. 10. Карты волновых фронтов линейных решеток, изготовленных с внесенными погрешностями фиксации начала координат (*a*), автоматической фокусировки (*b*) и угловой координаты (*c, d*)

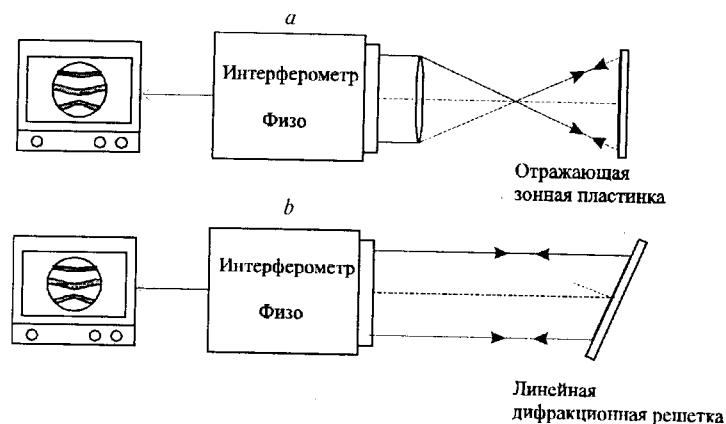


Рис. 11. Схемы измерения волновых фронтов зонной пластинки (а) и линейной решетки (b) с помощью интерферометра Физо

ДОО больше всего подходят для аттестации КЛЗС? Они должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) простота измерения формы волнового фронта;
- 2) возможность разделения различных типов ошибок.

Круговые 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 линейной решетки, позволяет проверить все остальные погрешности.

5.2. Измерения. На рис. 11, а, b показаны схемы измерения волновых фронтов с помощью интерферометра Физо (например, Zygo Mark II). Для измерения волнового фронта отражающей ЗП (см. рис. 11, а) применяется дополнительный объектив. Схема Литрова (см. рис. 11, b) используется для измерения формы волнового фронта линейной решетки.

Для экспериментальной проверки предложенных методов с помощью КЛЗС [9] были изготовлены линейные дифракционные решетки (период  $T = 2, 5$  и  $10$  мкм) и отражающие ЗП ( $R_m = 5$  мм,  $R = 25$  мм) с минимальным периодом колец  $1,2$  мкм. ДОО изготавливались методом прямой лазерной записи по термохимической технологии в пленках хрома толщиной  $100$  нм, нанесенных на высококачественные плоские полированные кварцевые подложки. Для исследования влияния погрешности фиксации начала координат указанная погрешность была специально внесена при записи ДОО путем сдвига платформы с фокусирующим объективом (см. рис. 1) на заданную величину. Форма волнового фронта ДОО измерялась с помощью интерферометра. Результаты измерений приведены на рис. 12. Хорошо видно качественное совпа-

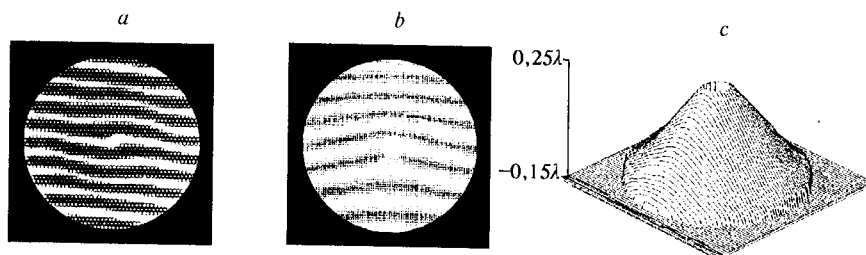


Рис. 12. Оптическая интерферограмма (а) волнового фронта, дифрагированного на тестовой линейной решетке ( $T = 5$  мкм), изготовленной на КЛЗС, с погрешностью начала координат, равной  $1$  мкм; интерферограмма (b) и карта (c) волнового фронта тестовой зонной пластинки, изготовленной с погрешностью начала координат, равной  $0,5$  мкм

дение расчетных (см. рис. 8, *a* и рис. 9, *b*) и реально измеренных волновых фронтов.

6. Исследование точности записи КЛЗС. Разработанная методика была применена для определения точности работы круговой записывающей системы (см. рис. 1). КЛЗС использовалась для изготовления тестовых ДОЭ, которые затем исследовались интерферометрически. Дифракционные структуры записывались по лазерной термохимической технологии [14] непосредственно на пленках хрома, нанесенных путем вакуумного напыления на высококачественные кварцевые подложки, проявлялись в селективном травителе [14] и далее исследовались как отражающие элементы (см. рис. 11) с помощью фотоэлектрического интерферометра Физо.

Погрешность волнового фронта ДОЭ возникает вследствие ошибок записи дифракционной структуры, ошибок, вносимых процессом проявления, неровностями подложки, процессом измерения [13]. Для того чтобы выделить погрешности записи, остальные ошибки должны быть минимизированы.

Поверхность подложек для тестовых ДОЭ полировалась с отступлением от плоскости менее чем  $0,05\lambda$  (пик-долина (ПД)) и  $0,001\lambda$  (среднеквадратичное значение (СКЗ)). Было установлено, что процесс проявления экспонированного хрома (исходная толщина слоя 100 нм) вносит изменение толщины  $\Delta h$  пленки (около 5 %) в зависимости от ширины записанной линии. Это приводит к появлению фазового сдвига  $\Delta\psi = 2\Delta h/\lambda$  между линиями разной ширины. Погрешность измерения волнового фронта ДОЭ с помощью интерферометра имеет несколько основных компонент: термическое расширение подложки ДОЭ, ошибки эталонного зеркала и обработки интерферограммы. При исследовании качества изготовления особо точных ДОЭ необходимо принимать во внимание также дискретность представления данных при расчете и записи.

Ожидаемые величины этих ошибок (максимальные значения) для КЛЗС даны в табл. 2. Приведенные в таблице данные получены на основе измерения характеристик отдельных узлов КЛЗС. Во время записи погрешности воздей-

Т а б л и ц а 2

Ожидаемая сумма ошибок при изготовлении ДОЭ диаметром 50 мм и минимальным периодом структуры 1,4 мкм

Погрешность	Типичная величина	Волновые aberrации (ПД, в долях $\lambda$ )	
		Линейная решетка	Круговая ЗП
Погрешность записи:	$\Delta r, \Delta\varphi$		
начало координат	0,05 мкм, 0,5 угл. с	0,035	0,035
угловая координата	1 угл. с	0,07	—
траектория вращения	0,05 мкм, 0,5 угл. с	0,035	0,035*
радиальная координата	0,1 мкм, 0,5 угл. с	0,07	0,07
автоматическая фокусировка	0,03 мкм, 0,02 угл. с	0,02	0,02*
представление данных	0,04 мкм, 0,75 угл. с	0,03	0,03
Погрешность толщины пленки хрома, внесенная селективным травлением	$\Delta h = 5$ нм	0,015	0,015
Погрешность измерения:			
термическое расширение подложки (3 °С)	0,03 мкм	0,02	0,01
эталонное зеркало	0,05 $\lambda$ на поле 100 мм	0,025	0,025
обработка интерферограммы	0,001 $\lambda$	0,001	0,001
Суммарная погрешность		0,12	0,1

\* Волновые aberrации круговой ЗП, связанные угловым положением, могут быть исключены математической обработкой (усреднением по углу).

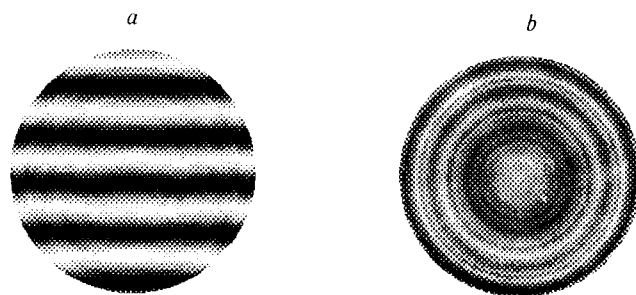


Рис. 13. Результаты измерения волновых фронтов зонной пластинки ( $R_m = 29$  мм,  $f = 32$  мм), изготовленной с помощью КЛЗС: интерферограмма (а) и полутоновая карта (б), использующая градации серого для представления фазы с полной шкалой вариаций  $\pm\lambda/20$

ствуют в достаточной степени независимо друг от друга, поэтому суммарная погрешность подсчитывалась как среднеквадратичная сумма составляющих.

Для получения обобщенной экспериментальной оценки точности записи была изготовлена тестовая ЗП с параметрами:  $R_m = 29$  мм,  $f = 32$  мм,  $\lambda = 0,6328$  мкм. ЗП имела 9879 колец с периодом от 141 мкм в центре до 1,41 мкм на краю. Продолжительность записи составила около 1,5 ч, в течение этого времени температура окружающего КЛЗС воздуха поддерживалась равной  $21 \pm 0,05$  °С.

На рис. 13 показаны интерферограмма и полутоновое изображение фазы волнового фронта ЗП. Форма дифрагированного волнового фронта имеет среднеквадратичное отклонение от расчетного (сферического), равное  $W_{rms} = 0,018\lambda$ , и максимальное местное отклонение  $W_{pv} = 0,1\lambda$ . Исходя из полученных данных, среднеквадратичную ( $\delta_{rms}$ ) и максимальную ( $\delta_{pv}$ ) погрешности изготовления данного образца ЗП можно оценить следующим образом [14]:

$$\delta_{rms} = \frac{\tilde{T}W_{rms}}{\lambda} \approx 0,04 \text{ и } \delta_{pv} = \frac{T_{min}W_{pv}}{\lambda} \approx 0,14 \text{ мкм, где } \tilde{T} = 2,05 \text{ мкм — среднеквадратичный и } T_{min} = 1,41 \text{ мкм — минимальный периоды изготовленной ЗП.}$$

Видно, что значения погрешностей изготовления, полученные на основании измерения волновых aberrаций тестовой ЗП и приведенные в табл. 2, приблизительно одинаковы. Это дает возможность утверждать, что метод, основанный на анализе волновых фронтов тестовых ДОЭ, позволяет оценить точность работы лазерных записывающих систем.

**Заключение.** Круговая лазерная записывающая система — это высокоточное и универсальное устройство для изготовления дифракционных оптических элементов: решеток, зонных пластинок, синтезированных голограмм, оптических шкал и т. д. Точность, пространственное разрешение и рабочее поле КЛЗС достаточны для решения широкого круга задач в оптике, измерительной технике, микромеханике и лазерной технике.

В отличие от традиционных систем, работающих в прямоугольной системе координат, КЛЗС имеет ряд специфических источников погрешностей записи, влияющих на качество изготавливаемого ДОЭ. Это ошибка фиксации начала координат, погрешность угловой координаты и неидеальность вращения стола с подложкой. Показано, что погрешности записи влияют на качество волнового фронта ДОЭ, причем в наибольшей степени в окрестностях начала координат.

Оссимметричные ЗП наиболее подходят для проверки погрешностей радиальной координаты и фиксации начала координат. Погрешности угловой координаты не влияют на волновой фронт ЗП. Интерферометрический анализ волновых фронтов, отраженных от линейной решетки, позволяет проверить все остальные погрешности, вносимые при записи.

Экспериментальное исследование волнового фронта зонной пластинки диаметром 58 мм с числовой апертурой около 0,45 показало, что совокупная среднеквадратичная погрешность радиальной координаты КЛЗС, разработанной в ИАиЭ СО РАН, не превышает 0,04 мкм.

Интерференционный контроль формы сферического волнового фронта, сформированного тестовым ДОЭ с числовой апертурой 0,45, показал, что погрешность волнового фронта не превышает  $\pm\lambda/20$ . Достигнутая точность соответствует требованиям, предъявляемым к эталонным оптическим системам («пробным стеклам») традиционной оптики. Учитывая, что лазерная технология синтеза ДОЭ позволяет изготавливать элементы, формирующие волновые фронты асферической и любой произвольно заданной формы, проведенные исследования дают возможность утверждать о создании технической базы производства «асферических пробных стекол» для контроля высококачественных оптических элементов и систем.

Работа поддержана Международным грантом Сибирского отделения РАН (Постановление Президиума СО РАН № 175, июль 1997 г.).

Авторы выражают благодарность проф. Дж. Берджу из Аризонского университета и д-ру П. Перло из Исследовательского центра фирмы «Фиат» за полезные советы, обсуждения и помощь при проведении интерферометрических измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. Киноформные линзы. Ч. I. Оптический метод получения фотошаблона // Автометрия. 1977. № 5. С. 71.
2. Hatley M. C., Stevens R. F., Wilson S. J. The manufacturing of blazed zone plates using a Fabry — Perot interferometer // J. Mod. Opt. 1988. 35, N 2. P. 265.
3. Riedl M., McCann J. Analysis and performance limits of diamond turned diffractive lenses for 3—5 and 8—12 micrometer region // SPIE Critical Review. 1991. CR 38.
4. Schwider J., Burov R. Testing of aspherics by means of rotational-symmetric synthetic holograms // Opt. Appl. 1976. 6. P. 83.
5. Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Kokoulin F. I. et al. Fabrication of kinoform optical elements // Optik. 1984. 67, N 3. S. 257.
6. Goltsov W., Liu S. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication // Proc. SPIE. 1990. 1211. P. 137.
7. Nomura T., Kamiya K. An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe // Precision Eng. 1994. 16. P. 290.
8. 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.
9. Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Korolov V. P. et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning // Proc. SPIE. 1995. 2363. P. 290.
10. Buynov N., Larionov N. P., Lukin A. V. et al. Holographic interferometric inspection of aspherical surfaces // Optical Technology. 1971. 38. P. 194.
11. Turunen J., Vasara A., Friberg A. Holographic generation of diffractive-free beams // Appl. Opt. 1988. 27. P. 3959.
12. Neugebauer G., Hauck R., Bryngdahl O. Computer-generated holograms: carrier of polar geometry // Appl. Opt. 1985. 24, N 6. P. 777.
13. Burge J. H. Advance technology for measuring primary mirrors for astronomical telescopes: Diss. Dr. Ph. Sci. University of Arizona, 1993.
14. Cherkashin V. V., Churin E. G., Burge J. H. et al. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // Proc. SPIE. 1997. 3010. P. 168.
15. Cherkashin V. V., Churin E. G., Kirianov A. V. et al. Circular laser writing system — CLWS-300C/EOS Topical Meeting Digest Series // Diffractive Optics. 1997. 12. P. 222.
16. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформ на функцию зрачка // Автометрия. 1985. № 6. С. 38.

*Поступила в редакцию 29 сентября 1997 г.*