

# ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

## ТОЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРНЫМИ ЗАПИСЫВАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ С КРУГОВЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

*В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск)*

### *Аннотация*

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 структур, изготовленных с помощью записывающей системы - линейных дифракционных решеток и круговых зонных пластинок. В качестве примера приведена оценка точности работы лазерной записывающей системы, разработанной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН. Система предназначена для изготовления на подложках до 300 мм диаметром 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 используемый в настоящее время процесс для изготовления высокоточных оптических поверхностей в металлах, полимерах и кристаллах. Этот способ позволяет получать заданный фазовый профиль ДОЭ, однако его область применения ограничена изготовлением элементов с аксиальной симметрией. Сканирующие методы прямой лучевой записи [4-9] являются наиболее универсальными. Они 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 (в прямоугольной системе координат), или кругами и спиралями (в полярной системе 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 прямоугольников и появлению дополнительного шума в формируемом изображении. Существует ряд типов ДОЭ, для которых рассеяние света и точность выполнения структуры являются критическим фактором. Для таких элементов предпочтительной является запись в полярной системе координат. Это - основная часть фокусирующей оптики, синтезированные голограммы с несущей в полярной системе координат [12], формирователи бездифракционных пучков [11], корректоры волновых фронтов [10] и т. д.

Синтезированные голограммы для коррекции, контроля и аттестации асферических волновых фронтов главных зеркал современных телескопов должны иметь точность выполнения кольцевой дифракционной структуры не хуже 0.1 мкм и минимальный период менее 1 мкм, при общих размерах в несколько сотен миллиметров [13,14]. Это позволит обеспечить отступление формы волнового фронта от расчетного не больше, чем  $\lambda/20$  при угловых апертурах порядка 0.5. Это очень жесткое требование. В этом случае важно знать с какой точностью воспроизводится расчетная форма волнового фронта при прохождении через синтезированный элемент. Это позволило бы устранить проблемы, которые имели место при создании космического телескопа «Хабл» - изготовление очень дорогого главного зеркала с неправильной формой из-за ошибок в оптической системе контроля. Дифракционные элементы для аттестации такой оптики могут быть изготовлены только с помощью устройств, использующих для записи полярную систему координат. Поэтому при выборе метода изготовления ДОЭ необходимо учитывать специфику их применения.

Работы по синтезу ДОЭ с помощью сканирующих лазерных систем были начаты в Лаборатории лазерных технологий Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН во второй половине 70-х годов. В начале 80-х было создано первое записывающее устройство [17], позволяющее изготавливать ДОЭ с осевой симметрией и пространственным разрешением до  $600\text{-}800\text{ мкм}^{-1}$ . Первые эксперименты по записи структур ДОЭ с осевой симметрией осуществлялись на тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников. Разработка, в дальнейшем, термохимической технологии записи на пленках хрома позволила существенно улучшить качество изготавливаемых ДОЭ. В конце 80-х годов был разработан способ записи произвольных бинарных изображений в полярной системе координат. Это позволило осуществить синтез ряда уникальных дифракционных и гибридных элементов, угловых оптических шкал, мастер-дисков для оптической памяти и т.д. Второе поколение лазерных записывающих устройств с круговым сканированием появилось в начале 90-х годов [9] и позволило значительно увеличить точность записи. По совокупным параметрам, устройство не имеет аналогов. Эта разработка послужила прототипом для создания совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН серии устройств типа CLWS-300 [15], которые используются для синтеза ДОЭ в ряде лабораторий Германии и Италии.

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. Приведен анализ наиболее типичных источников ошибок записи: погрешности угловой и радиальной координаты, начала координат, по-

грешность траектории вращения и автоматической фокусировки. Цель исследования - установить взаимосвязь ошибок записи и погрешностей волнового фронта дифракционных элементов, изготовленных с помощью КЛЗС. Представлены характеристики изготовленных ДОЭ - зонных пластинок и линейных решеток, а также приведены методы измерения ошибок изготовления.

### 1. Круговая лазерная записывающая система

Функциональная схема КЛЗС [9] приведена на рис. 1, а основные технические характеристики - в таблице 1. Записывающая система состоит из четырех основных частей: шпинделя на аэростатических опорах с приводом вращения от электрического двигателя, платформы линейного перемещения, лазерной системы экспонирования и управляющих блоков.

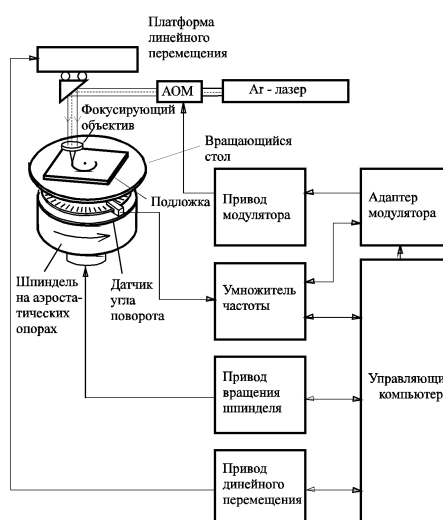


Рис.1. Функциональная схема разработанной в ИАиЭ СО РАН круговой лазерной записывающей системы.

Таблица 1  
Характеристики круговой лазерной записывающей системы ИАиЭ СО РАН

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	<ul style="list-style-type: none"> <li>Термохимическая технология записи на пленках хрома;</li> <li>полутонковая технология прямой записи на пленках аморфного кремния;</li> <li>технология прямого формирования микрорельефа на пленках фоторезистов.</li> </ul>

Подложка со светочувствительным материалом крепится на столе, установленном на торце шпинделя, вращающегося на аэростатических опорах. На оси шпинделя установлен датчик измерения угла поворота (среднеквадратичная точность - около 1 угл. с). Этот 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 экспонированием внутренней и внешней границы дифракционной зоны путем кругового сканирования и заполнением внутренней части зоны сканированием по спирали. Для записи ДОО с произвольной структурой используется программное обеспечение, преобразующее прямоугольную систему координат (в которой был рассчитан ДОО) 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. В качестве светочувствительного материала используются тонкие пленки хрома, аморфного кремния или фоторезиста [14].

Внешний вид оптико-механического блока описываемого устройства показан на рис.2а. Номера отмечены: 1 - шпиндель, 2 - записывающий лазер, 3 - гранитное основание, 4 - АОМ, 5,7 - фотоприемники контроля мощности лазера и записи, 6 - платформа перемещения с системой автоматической фокусировки. На рис.2б, в и г приведены примеры микроизображений различных структур изготовленных на КЛЗС. Видно, что

ДОО с осевой симметрией (Рис.2г) записывается идеально, в то время как искажения, вносимые полярной системой координат при записи ДОО с произвольной структурой (Рис. 2 б, в) практически не видны.

## 2. Погрешности круговой лазерной записывающей системы

Задачей изготовления ДОО является запись бинарных (т.е. имеющих две градации пропускания или фазы), рельефных или полутонковых структур площадью до  $1-3 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$  с минимальными размерами структуры менее 1 мкм и точностью границ 0.1-0.2 мкм по всей поверхности элемента. Структура ДОО 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 ДОО. Эти погрешности имеют две составляющие:

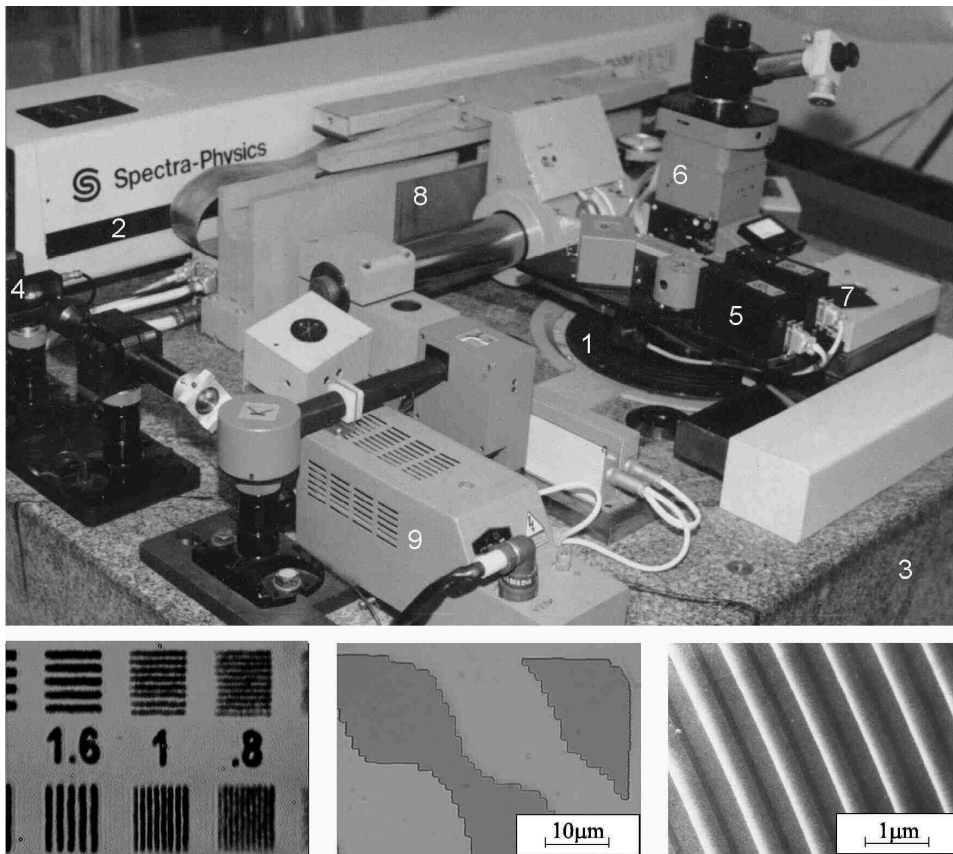
- 1) конечное расстояние между расчетной  $P_i(r_i, \varphi_i)$  и записанной  $P_i'(r_i', \varphi_i')$  координатами точек, следовательно,  $\varepsilon_i = P_i(r_i, \varphi_i) - P_i'(r_i', \varphi_i')$  - погрешность координаты записи;
- 2) разница между расчетным и реально записанным размером и формой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

Абсолютная погрешность координаты  $\varepsilon_i$  зависит от точности перемещения лазерного пучка относительно подложки. Эта погрешность после записи приводит к появлению дополнительного сдвига фазы волнового фронта, прошедшего через ДОО. 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

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

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

Величина ошибки размера записываемой точки определяется условиями записи (величиной экспозиции, пространственным разрешением светочувствительного материала и др.) и практически не зависит от системы координат, которая используется для записи.



**Рис.2.** Внешний вид (а) оптико-механического блока КЛЗС и примеры записанных микроструктур: микрофотография (б) записанного на пленке хрома тестового изображения (период линий - 2; 1,6; 1 и 0,8 мкм); микрофотография (в) участка синтезированной голограммы (дискретность 2 мкм) с функцией пропускания заданной стандартным РСХ файлом; SEM микрофотография (г) внешних зон ДОЭ для формирования асферического волнового фронта. Период зон 1.2 мкм.

### 3. Анализ ошибок записи

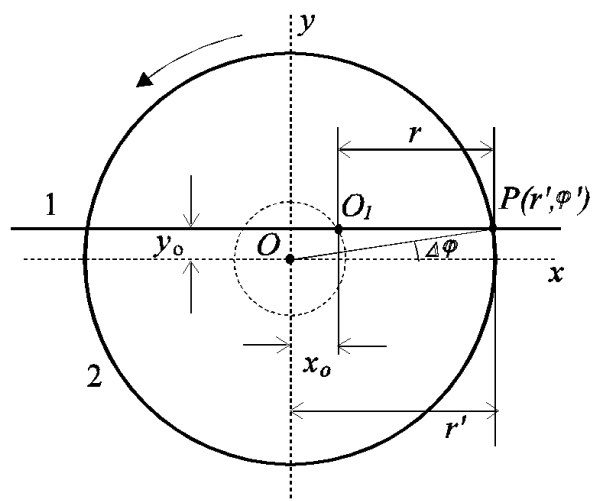
Рассмотрим специфические для КЛЗС источники погрешностей, приводящие к сдвигу координаты записи. Совокупная погрешность записи определяется, в основном, следующим:

- 1) ошибкой фиксации начала координат, вызванной погрешностью совмещения центра полярной системы координат, используемой при расчете ДОЭ, и 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 системой автоматической фокусировки в координату записывающего пятна.

#### 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 - существенная 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.



**Рис.3.** Траектории записывающего лазерного луча.  $O$  - центр вращения шпинделя,  $O_1$  - начало отсчета координаты лазерным интерферометром.

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. Отрезки  $y_0$  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  $r'$  определяется как

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

и полярный угол  $\varphi'$  как

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

Ошибка фиксации начала координат (расстояние между точками O и  $O_1$  на рис. 3) экспериментально определяется 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 координат

Погрешность угловой координаты является специфической для круговой записывающей системы. Оптико-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  $\delta\varphi = 2\pi/N$  - 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 является неравномерность интервалов  $\delta\varphi$ , вызванная вибрацией шпинделя, электрическими шумами, вносимыми системой ФАПЧ, погрешностью датчика угла поворота и т.д. Погрешность угловой координаты представляет собой периодическую функцию (период - угол поворота шпинделя на  $360^\circ$ ) и может быть представлена рядом Фурье:

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

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 среднеквадратичная величина погрешности угловой координаты не превышает 1 угл. с (скорость вращения - 10 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 0.25мкм (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 была изготовлена на подложке с хромовым покрытием по термохимической технологии с помощью КЛЗС типа CLWS-300с. Хорошо видно несколько первых гармоник распределения ошибок угловой координаты.

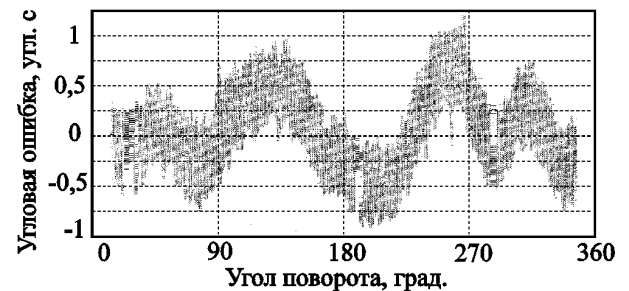


Рис.4. Типичная функция распределения погрешностей угловой координаты КЛЗС типа CLWS-300С.

### 3.3. Погрешность траектории вращения

Погрешность траектории вращения шпинделя (рис. 5,а) - 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 отклоне-

ния оси вращения (биения 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, б показан реальный пример траектории движения точки на вращающемся столе КЛЗС. Кривая 2 получена путем измерения (через каждые 1.8°) 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:

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

и

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

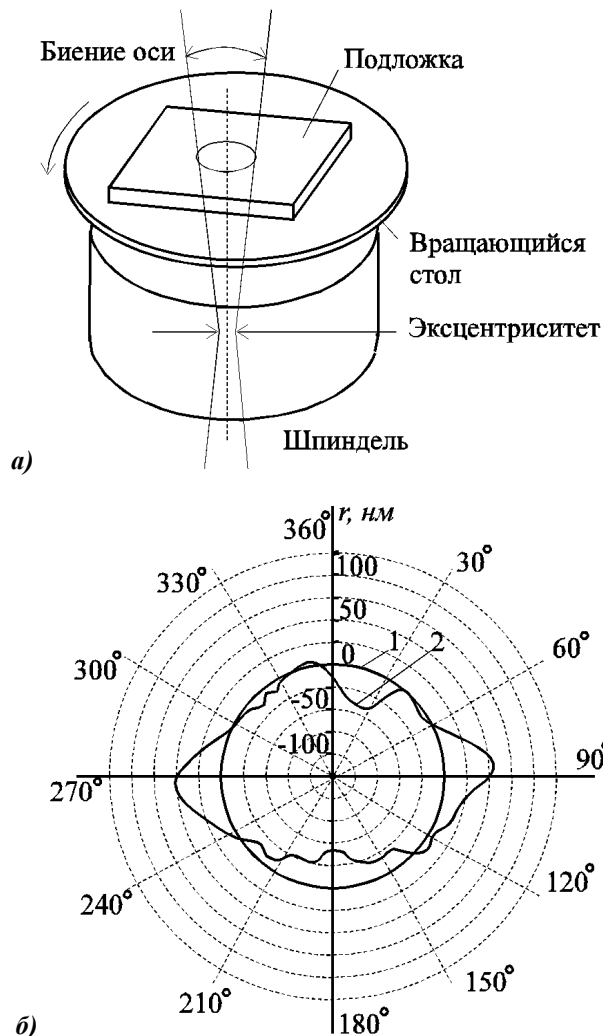


Рис.5. Биение оси вращения шпинделя (а) и отклонение центра вращения шпинделя от среднего значения (б). 1- идеальная траектория (круг), 2- реально измеренная траектория вращения некоторой точки на торце шпинделя.

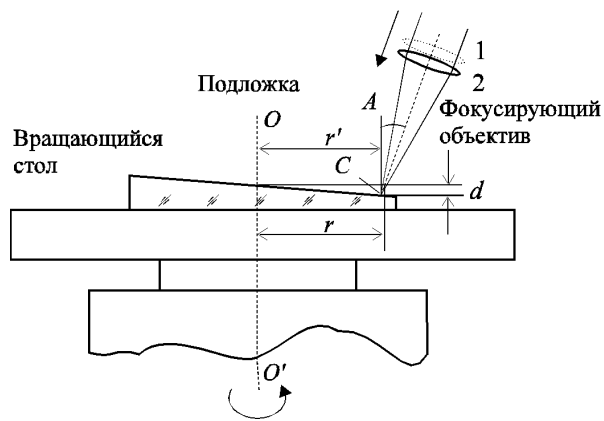


Рис.6. Погрешности координаты записывающего пучка, вносимые системой автоматической фокусировки.

### 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 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:

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

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  $\alpha_r$  в плоскости  $OO'S$  (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  $OO'S$  (тангенциальная плоскость) - к появлению угловой ошибки  $\Delta\varphi_a$ . Используя обозначения рис. 6, можно показать (при  $d \ll r$ ), что

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

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

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  $\Delta\varphi_a \approx 0.2$  угл. с.

### 4. Точность изготовления ДООЭ 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 ДООЭ 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

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

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

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

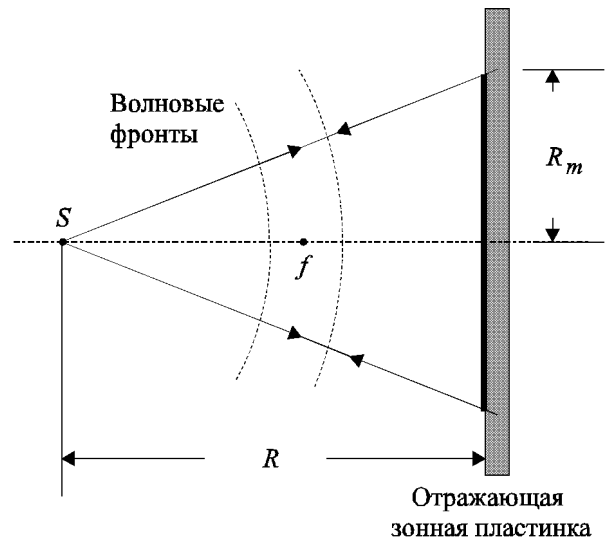


Рис. 7. Тестовая отражающая зонная пластинка:  $R$  - радиус кривизны волнового фронта,  $R_m$  - максимальный радиус зонной пластинки,  $f$  - точка фокуса.

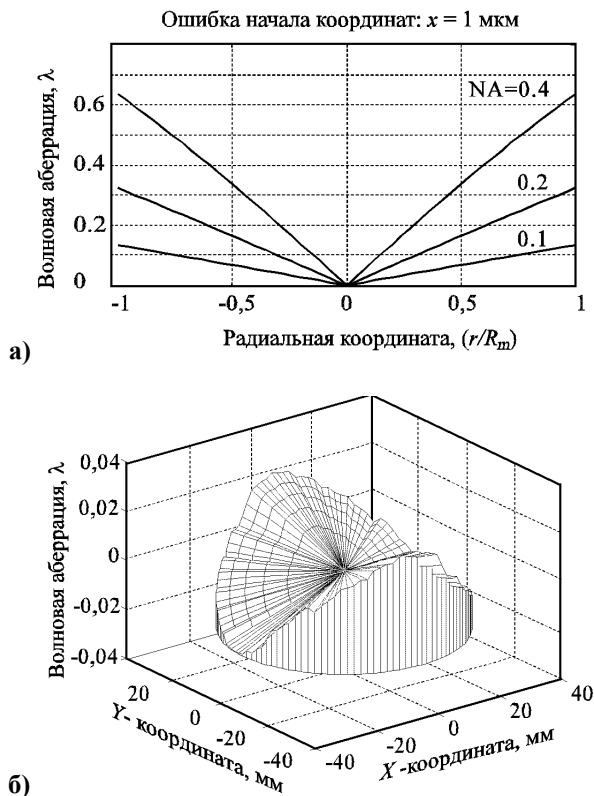
Функцию aberrации волнового фронта (при  $x_0 \ll r$ ) можно записать таким образом:

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

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).

Погрешности записи, вносимые не идеальностью 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 враще-

ния показан на рис. 8,б. На этом рисунке приведена рассчитанная с помощью выражений (1) и (8) карта волнового фронта зонной пластинки с 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, в (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 aberrации порядка  $\lambda/20$ , что является приемлемым для большинства применений.



**Рис.8. Аберрации волнового фронта тестовой зонной пластинки, вызванные погрешностями изготовления. Погрешность фиксации начала координат (а) - волновые aberrации тестовой зонной пластинки для нескольких величин числовой апертуры; погрешность траектории вращения (б) - карта волнового фронта зонной пластинки изготовленной на КЛЗС с траекторией вращения шпинделя, приведенной на рис. 5б.**

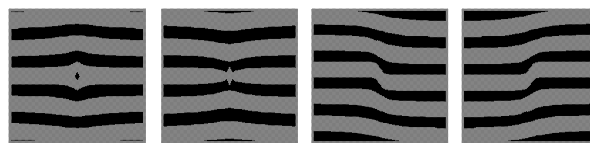
### 5.2 Линейные дифракционные решетки

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  $\varepsilon_i = x'_i - x_i$ , где  $x_i = r_i \cos(\varphi_i)$ , вызывают искажение формы штрихов решетки и следовательно aberrации волнового фронта, дифрагировавшего на этой решетке. Волновые aberrации, вызванные искажениями формы штрихов решетки в окрестности  $i$ -ой 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).



**Рис.9. Интерферограммы (компьютерное моделирование) волновых фронтов, дифрагированных на линейных решетках, изготовленных с ошибками фиксации начала координат: а - 0.5T поперек штрихов, б - -0.5T поперек штрихов, с - 0.5T вдоль штрихов, д - -0.5T вдоль штрихов решетки.**

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

- простота измерения формы волнового фронта;
- 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, в показаны схемы измерения волновых фронтов при помощи интерферометра Физо (например Zygo Mark II). Для измерения волнового фронта отражающей ЗП (см. рис. 11, а) применяется дополнительный объектив. Схема Литрова (см. рис.11, в) используется для измерения формы волнового фронта линейной решетки.

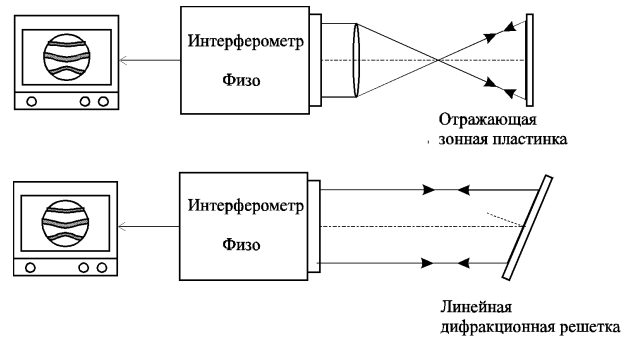


Рис.11. Схемы измерения волновых фронтов зонной пластинки (а) и линейной решетки (б) с помощью интерферометра Физо.

Для экспериментальной проверки предложенных методов с помощью КЛЗС [9] были изготовлены линейные дифракционные решетки (период  $T = 2, 5, \text{ и } 10 \text{ мкм}$ ) и отражающие ЗП ( $R_m = 5 \text{ мм}, R=25 \text{ мм}$ ) с минимальным периодом колец  $1.2 \text{ мкм}$ . ДОЭ изготавливались методом прямой лазерной записи по термохимической технологии в пленках хрома толщиной  $100 \text{ нм}$ , нанесенных на высококачественные плоские полированные кварцевые подложки. Для исследования влияния погрешности фиксации начала координат, указанная погрешность была специально внесена при записи ДОЭ, путем сдвига платформы с фокусирующим объективом (см. рис. 1) на заданную величину. Форма волнового фронта ДОЭ измерялась с помощью интерферометра Zygo. Результаты измерений приведены на рис. 12. Хорошо видно качественное совпадение расчетных (см. рис. 8, а и рис. 9, в) и реально измеренных волновых фронтов.

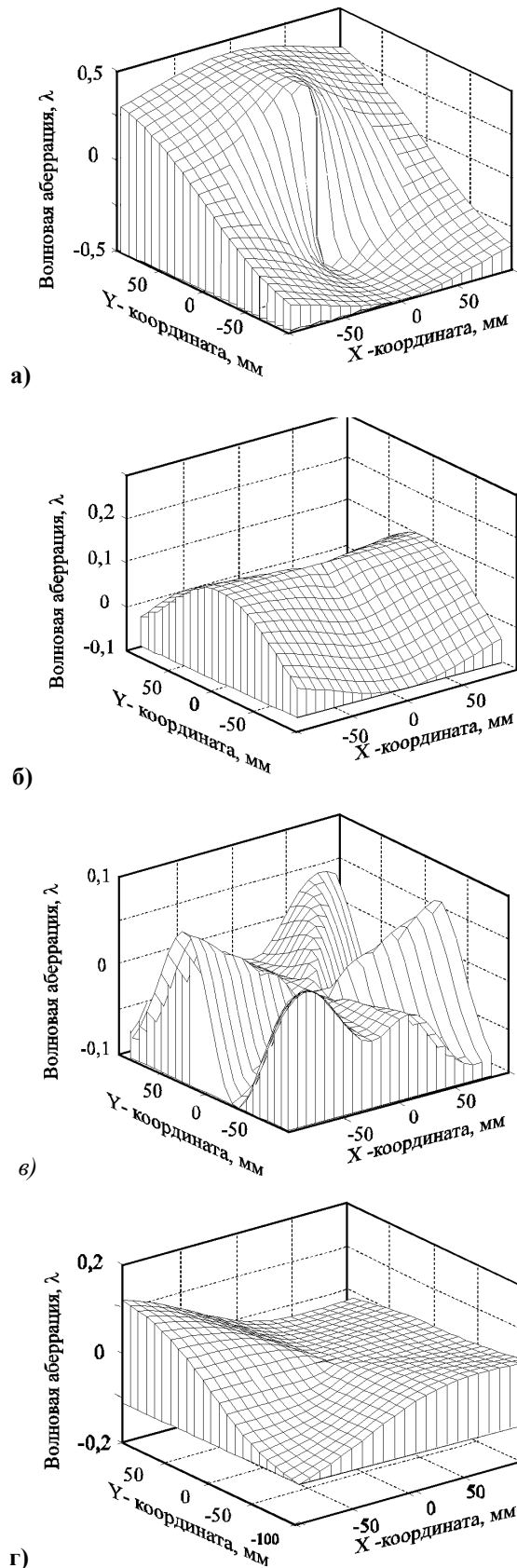


Рис.10. Карты волновых фронтов линейных дифракционных решеток, изготовленных с внесенными ошибками: а - фиксации начала координат, б - автоматической фокусировки, в и г - угловой координаты.

## 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 из-за ошибок записи дифракционной структуры, ошибок, вносимых процессом проявления, неровностями подложки, процессом измерения [13]. Для того чтобы выделить, собственно, погрешности записи, остальные ошибки должны быть минимизированы.

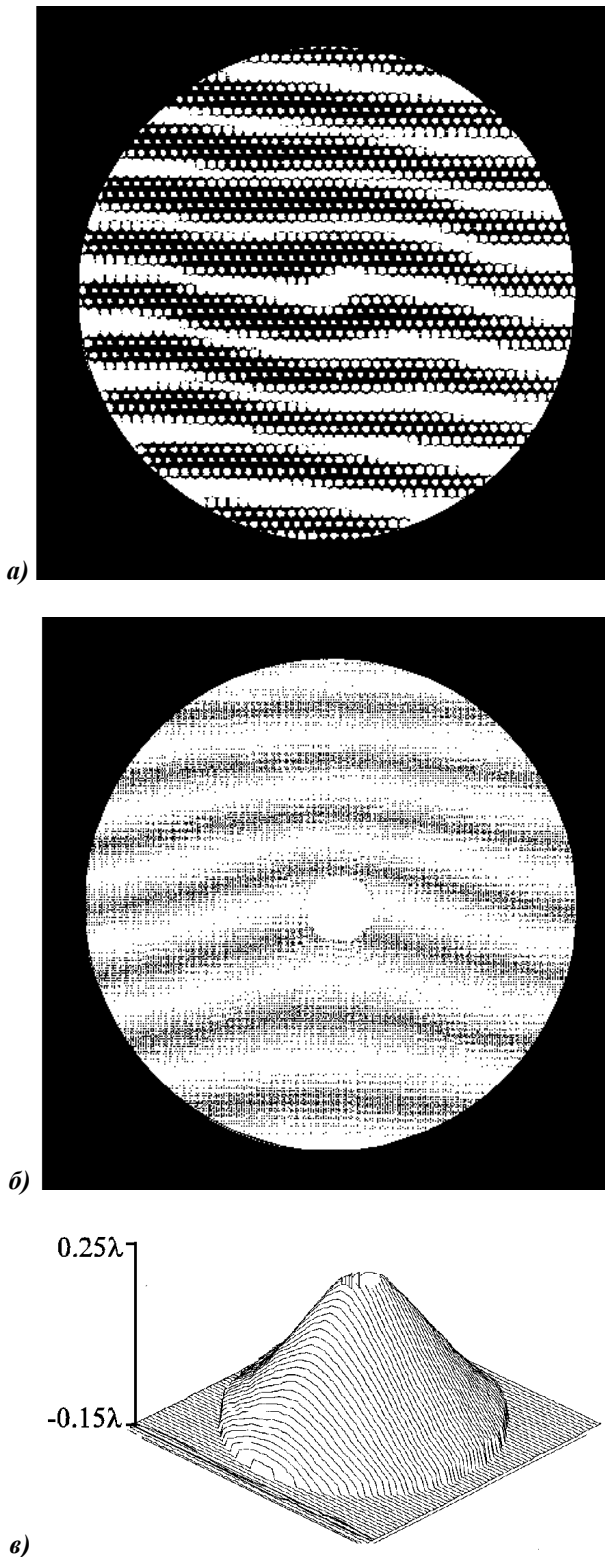
Поверхность подложек для тестовых ДОЭ полировалась с отступлением от плоскости менее чем  $0.05\lambda$ , пик-долина (ПД), и  $0.01\lambda$ , средне - квадратичное значение (СКЗ). Было установлено, что процесс проявления экспонированного хрома (исходная толщина слоя - 100 нм) вносит изменение толщины  $\Delta h$  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 приведены в таблице 2.

Приведенные в таблице данные получены на основе измерения характеристик отдельных узлов КЛЗС. Во время записи погрешности воздействуют 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 часа, в течении которого температура окружающего КЛЗС воздуха поддерживалась равной  $21\pm 0.05^\circ\text{C}$ .

На рис.13 показаны интерферограмма и полутоновое изображение фазы волнового фронта ЗП. Форма дифрагированного волнового фронта имеет среднеквадратичное отклонение от расчетного (сфе-



**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 (б) и карта (с) волнового фронта тестовой зонной пластинки, изготовленной с погрешностью начала координат, равной 0.5 мкм.

рического), 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]:

$$\delta_{rms} = \frac{\tilde{T}W_{rms}}{\lambda} \approx 0.04''\tilde{h}\tilde{h}$$

и

$$\delta_{pv} = \frac{T_{\min}W_{pv}}{\lambda} \approx 0.14''\tilde{h}\tilde{h}$$

где  $\tilde{T} = 2.05$  мкм - среднеквадратичный и  $T_{\min} = 1.41$  мкм - минимальный период изготовленной ЗП.

Видно, что значения погрешностей изготовления, полученные на основании измерения волновых aberrаций тестовой ЗП и приведенные в табл. 2 приблизительно одинаковы. Это позволяет утверждать, что метод, основанный на анализе волновых фронтов тестовых ДОЭ, позволяет с приемлемой точностью производить оценку точности работы лазерных записывающих систем.

Таблица 2

Ожидаемая сумма ошибок при изготовлении ДОЭ диаметром 50 мм и минимальным периодом 1.4 мкм.

Погрешности:	Типичная величина	Волновые aberrации (ПД, в долях $\lambda$ )	
		Линейная решетка	Круговая ЗП
<b>Погрешности записи:</b>			
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*
погрешность представления данных	0.04 мкм, 0.75 угл. с	0.03	0.03
<b>Погрешность толщины пленки хрома, внесенная селективным травлением</b>	$\Delta h = 5$ нм	0.015	0.015
<b>Погрешности измерения:</b>			
термическое расширение подложки (3°C)	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
<b>Суммарная погрешность</b>		0.12	0.1

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

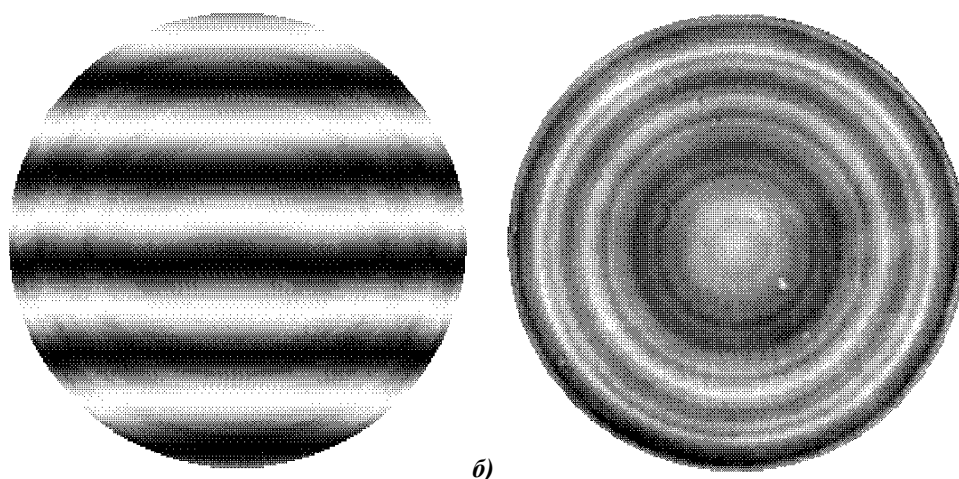


Рис.13. Результаты измерения волновых фронтов зонной пластинки ( $R_m = 29$  мм,  $f = 32$  мм), изготовленной с помощью КЛЗС: интерферограмма (а) и полутоновая карта (б), использующая градации серого для представления фазы с полной шкалой вариаций  $\pm\lambda/20$ .

### 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, лазерной технике и физике.

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

Осесимметричные 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 ДОО 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 ДОО позволяет изготавливать элементы, формирующие волновые фронты асферической и любой произвольно заданной формы, проведенные исследования позволяют 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 1997г.)

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

### Список литературы

1. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Михальцова И.А. Киноформные линзы. Оптические методы получения фотошаблона // Автометрия. 1977, № 5, С.71-79.
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**, №. 2. P. 265-280.
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., Burow R. Testing of aspherics by means of rotation-symmetric synthetic holograms // Opt. Appl., 1976 v.6, P.83-88.
5. Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Kokoulin F.I., Poleshchuk et. al. I. Fabrication of kinoform optical elements // Optika. 1984. **67**, № 3, P. 257-266 .
6. Goltsov W., Liu S. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication // Proc. SPIE. 1990. **1211**. P.137-147.
7. Nomura T., Kamiya K. An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe // Precision Engineering. 1994. **16**. P. 290-295.
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.2032-2038.
9. Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Korolkov V. P., A. G. Poleshchuk, et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning // Proc.of SPIE. 1995. **2363**, P.290-297.
10. Buynov N., Larionov N. P., Lukin A. V. et al. Holographic interferometric inspection of aspherical surfaces // *Optical Technology*. 1971. **38**. P. 194-197.
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.777-784.
13. Burge H. Advance technology for measuring primary mirrors for astronomical telescopes. Dr. Ph. Dissertation. University of Arizona, 1993.
14. Cherkashin V.V., E.G. Churin, J.H. Burge, V.P.Koronkevich, et al. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // Proc. SPIE, 1997. **3010**. P.168-179.
15. Cherkashin V.V., Churin E.G., Kirianov A.V. et at. Circular laser writing system - CLWS-300C / EOS Topical Meeting Digest Series// Diffractive Optics. 1997. **12**. P. 222-223.
16. Пальчикова И.Г., Рябчун А.Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Автометрия. 1985. №6.
17. Ведерников В.М. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов// Автометрия, 1981, №3, с.3-17..
18. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Чуринов Е.Г., Юрлов Ю.И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома// Квантовая электроника, 1985, №4, с. 755-761.