

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

А.Г. Полещук, В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Седухин  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

### Введение

Развитие оптики связывают с широким применением компьютерно-синтезированных *дифракционных оптических элементов* (ДОЭ), которые осуществляют модуляцию исходного волнового фронта путем вариации оптической и геометрической толщины материала [1, 2]. Спектр применения ДОЭ в различных областях оптоэлектроники, в том числе и лазерной метрологии, постоянно расширяется. Осуществляя геометрические и волновые преобразования новые элементы позволяют проектировать и создавать оптические измерительные системы нового класса, где эталонный волновой фронт задается топологией (структурой) элемента. Примером этому служит класс интерферометров, применяемых для контроля сферических и асферических оптических поверхностей.

Исследования по дифракционной оптике были начаты в Институте автоматики и электрометрии СО РАН в середине 70-х годов. Усилия были направлены на разработку как методов изготовления бинарных, многоуровневых и кусочно-непрерывных ДОЭ, так и новых типов элементов и оптических устройств на их основе. Создание *прецизионной* круговой лазерной системы записи (КЛЗС) [3] и прямой термохимической технологии разработанной с учетом специфики ДОЭ [4], позволили начать изготовление элементов имеющих высокие метрологические характеристики. Изготовленные нами дифракционные элементы были применены для аттестации и сертификации 6,5-м и 8,4-м главных зеркал телескопов изготовленных в Стюардсовской Обсерватории (Аризона, США.) [5]. В тоже время наши усилия были направлены на разработку новых методов изготовления фазовых ДОЭ со сложным профилем. Были записаны дифракционные структуры, с предельным (для лазерной записи в видимой области спектра) пространственным разрешением  $1600 \text{ мм}^{-1}$ . Одноступенчатые процессы изготовления и тиражирования позволили создать ДОЭ с кусочно-непрерывным профилем имеющие дифракционную эффективность, равную 80 – 95 %.

В настоящей работе приводятся краткий обзор результатов практического применения ДОЭ, созданных в ИАиЭ СО РАН по новым технологиям, в оптических измерительных системах.

### 1. Элементная база лазерных измерительных систем

Разработка новых лазерных измерительных систем потребовала создания адекватной элементной базы. Одним из таких элементов стала зонная пластинка (ЗП). Дифракционные элементы, разделяя падающие пучки по порядкам дифракции, осуществляют в дальней зоне их рекомбинацию. Фактически ЗП являются дифракционными интерферометрами, интерференционные полосы в которых, можно на-

блюдать за элементом на большом расстоянии. Меняя топологию ЗП, можно управлять полем интерференции, например, сжимать за счёт интерференции лазерные пучки, переходя от классического распределения Эри к распределению по Бесселю. Элементы с вытянутой вдоль оптической оси каустики нашли широкое применение в качестве эталона прямой линии. В интерферометрах ЗП может выполнять две функции: светоделителя и формирователя сферического или асферического эталонного волнового фронта. Свойство многофокусности используется в двухфокусном микроскопе.

Большой класс дифракционных элементов применяемых в измерительной технике составляют различные типы решеток – линейных и круговых. Очень широкое распространение получили решетки Дамана, которые используются, например, для считывания информации в многоканальных датчиках. Взамен классическим круговым решеткам, которые используются при угловых измерениях, пришли растрово-дифракционные шкалы, фактически исполняющие роль интерферометра.

### 2. Методы создания ДОЭ

Потенциальные возможности ДОЭ во многом определяются технологией их изготовления, которая должна обеспечивать восстановление формы волнового фронта с заданной точностью, достигающей для некоторых применений до  $1/20$  длины волны света.

До последнего времени для микроструктурирования оптических поверхностей применялось оборудование созданное для производства изделий микроэлектроники. Однако топологическая структура поверхности ДОЭ имеет произвольный характер, в то время как структура поверхности микросхемы имеет, как правило, вид системы линий и прямоугольников. В известных методах [6], дифракционная структура представлялась набором элементарных изображений – трапеций или прямоугольников, ориентированных вдоль двух фиксированных ортогональных осей. Однако это приводит к рассеянию света на углах и, как следствие, к появлению дополнительного шума и искажений в формируемом изображении. Существует ряд типов ДОЭ, для которых предпочтительным является не прямоугольная, а полярная система координат. К ним относятся основная часть фокусирующей оптики, синтезированные голограммы, формирователи бездифракционных пучков, корректоры волновых фронтов и т. д. [7, 8]. Синтезированные голограммы для контроля и аттестации асферических волновых фронтов главных зеркал современных телескопов должны иметь точность выполнения кольцевой дифракционной структуры не хуже  $0,1 \text{ мкм}$ , минимальный период менее  $1 \text{ мкм}$  и размеры в несколько сотен миллиметров [9]. Дифракционные элементы такого типа могут быть изготовлены только с помощью устройств, использующих для записи полярную систему координат.

При записи в полярных координатах, подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью, в то время как сфокусированное записывающее пятно перемещается вдоль прямой линии пересекающей центр вращения. При спиральном сканировании, реализуемом с помощью медленного непрерывного перемещения записывающего пятна, ДОО изготавливается как целое без остановок и возвратов. Это позволяет значительно уменьшить время записи, и избежать каких бы то ни было сшивок, типичных для X-Y устройств. Круговое сканирование, оптимальное для записи осесимметричных ДОО, реализуется методом дискретного перемещения записывающего пятна. Этот метод сканирования удобно применять и для синтеза ДОО с произвольной топологией, если компьютер не успевает подготовить данные для следующего оборота в процессе записи предыдущего. На рис. 1 показаны направления движения записывающего пятна и адресные сетки для кругового сканирования в полярной системе координат.

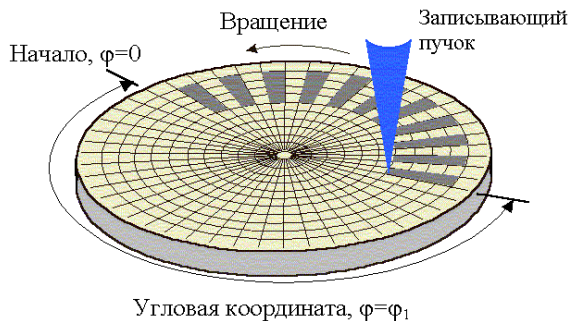


Рис. 1. Запись ДОО в полярной системе координат

### 3. Применение ДОО

Последние разработки в области технологий и оборудования для синтеза ДОО сделали реальным их мелкосерийное производство, что позволяет рассматривать их применение в современных измерительных устройствах как реальную насущную задачу. Рассмотрим несколько типичных примеров решения с помощью ДОО сложнейших метрологических задач.

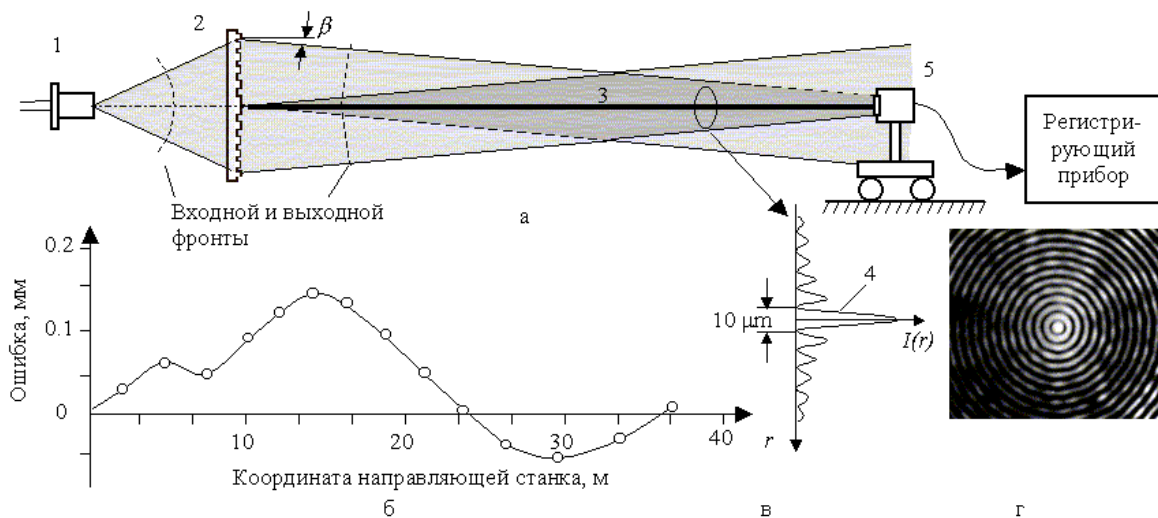


Рис. 2. Измерение прямолинейности с помощью линзакона

### 3.1. Измерение прямолинейности

Одно из основных свойств ДОО – возможность преобразования формы волнового фронта, было использовано в устройстве для измерения прямолинейности (рис. 2) [10]. Дифракционный элемент «линзакон» 2 преобразует сферический волновой фронт точечного источника 1, например, полупроводникового лазера (рис. 2 (а) в конический. Линзакон сочетает в себе функции коллимирующего объектива и аксикона. Радиусы зон такого элемента выполняются в соответствии с выражением:

$$r_k = c \frac{\sin \beta}{\cos^2 \beta} \pm \sqrt{c^2 \frac{\sin^2 \beta}{\cos^4 \beta} - \frac{2kl + k^2 \lambda^2}{\cos^2 \beta}},$$

где  $c=l+k\lambda$ ,  $l$  – расстояние между источником излучения и линзаконом,  $\beta$  – угол, под которым лучи пересекают оптическую ось в плоскости наблюдения,  $\lambda$  – длина волны источника излучения. В области пересечения 3 световых пучков возникает интерференционная картина (рис. 2 (в, г), которая описывается квадратом функции Бесселя 0-го порядка:

$$I(r) \sim J_0^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \beta r\right)$$

Центр светового распределения 4 является опорной световой линией, которая может быть использована для проверки прямолинейности, например направляющих станков. Для этого используется координатно-чувствительный фотоприемник 5. Результаты измерения отклонения от прямолинейности направляющих длиной 36 м приведены на рис. 2 (б).

### 3.2. Измерение формы объектов

Измерение формы 3-х мерных объектов может производиться методом светового сечения [11]. Для этого, лазерный пучок преобразуется линзаконом в тонкую световую линию (аналогично рис. 2 (а), которой затем сканируется исследуемый объект. Компьютерный анализ изображения с видеокамеры, которая располагается под некоторым углом к плоскости сканирования, позволяет получить достоверную информацию о форме и размерах объекта в различных сечениях.

На рис. 3 приведено изображение траектории сканирования лазерным пучком, сформированным линзаконом, при измерении формы объекта (тарелки) и результаты компьютерного восстановления формы сечения объекта.

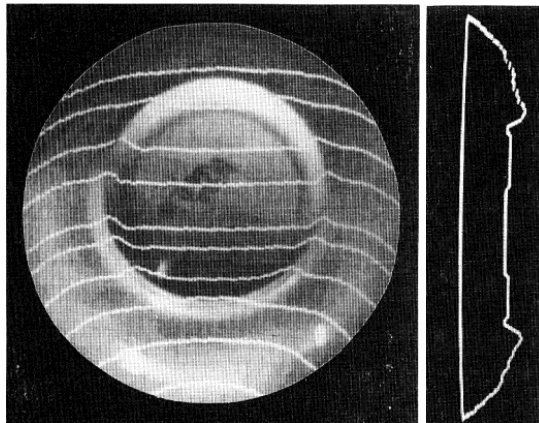


Рис. 3. Результаты измерения и компьютерной обработки формы объекта

### 3.3. Двухфокусный микроскоп

В ряде областей науки и техники существует проблема оптического контроля взаимного положения микроизображений, расположенных в двух различных плоскостях. Использование свойств ДОЭ позволяет легко решить эту проблему несколькими способами.

При освещении ЗП с фокусным расстоянием  $f_0$  для длины волны  $\lambda_0$ , световым потоком с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  образуются, по крайней мере, две фокальные плоскости, расстояние между которыми

$$\delta = f_0 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_0}$$

Бифокальная хроматическая система имеет два фокуса и строит два изображения различного цвета одного объекта, если для освещения используется источник света с двумя длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Величина  $\delta$  изменяется при перестройке одной из используемых длин волн.

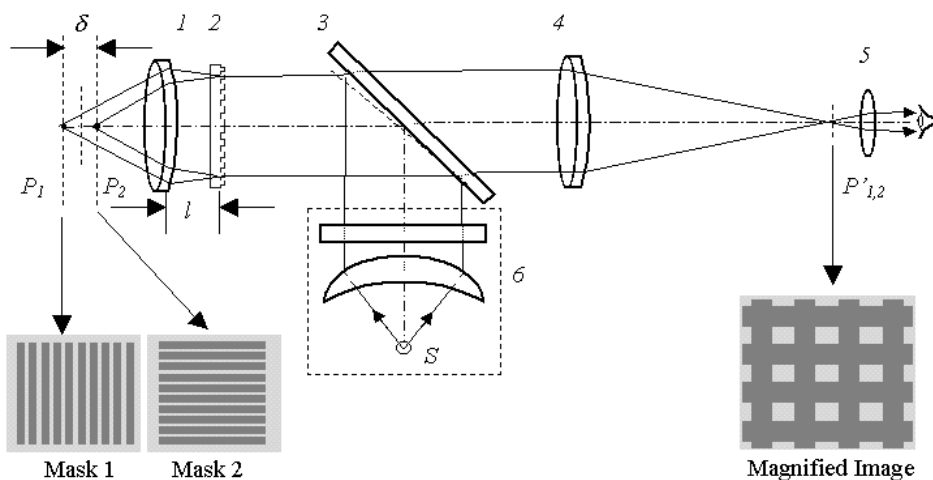


Рис. 4. Двухфокусный микроскоп

$$\delta = 2 f_{obj}^2 \lambda / \lambda_0 f_0$$

Более простая монохроматическая бифокальная оптическая система (рис. 4) может быть создана с использованием обычной фазовой ЗП, которая 81% световой энергии распределяет поровну между фокусами  $\pm 1$ -го порядка. При установке ЗП 2 последовательно с объективом 1 микроскопа, возникают две фокальные плоскости  $P_1$  и  $P_2$ . Лучи, дифрагированные в  $-1$  порядок собираются за фокальной плоскостью объектива (фокусное расстояние  $f_{obj}$ ) в плоскости  $P_1$ , а дифрагированные в  $+1$  порядок, соответственно, в плоскости  $P_2$ . Расстояние  $\delta$  между этими плоскостями (при  $f_0 \gg f_{obj}$ ,  $f_0 \gg l$ ) можно определить из простого соотношения. При  $f_0 = 10$  мм,  $f_{obj} = 1000$  мм, расстояние  $\delta$  между плоскостями наблюдения изменяется от 150 до 200 мкм в спектральной области 500–650 нм. Осветитель микроскопа 6 выполнен по схеме Келлера и обеспечивает телецентрический ход лучей через микрообъектив 1 с ЗП 2. Лучи света, отразившись от объектов расположенных в плоскостях  $P_1$  и  $P_2$ , снова проходят двухфокусную систему, светоделитель 3 и тубусный объектив 4, который совмещает изображения микрообъектов в плоскости  $P'_{1,2}$ . Двухфокусный микроскоп [12] был успешно применен в установке рентгеновской литографии для контроля совмещения рентгеношаблона и пластины, располагаемых на расстоянии до 150 мкм.

### 3.4. Миниатюрные датчики для контроля качества поверхности

В контрольно-измерительной технике получили широкое распространение миниатюрные оптические датчики для измерения малых продольных и поперечных перемещений поверхности и контроля наличия дефектов. Типичным датчиком такого типа является считывающая головка (СГ) лазерного проигрывателя. СГ включает в себя датчик ошибки фокусировки (измерение продольного перемещения), датчик поперечного смещения и датчик отраженного света.

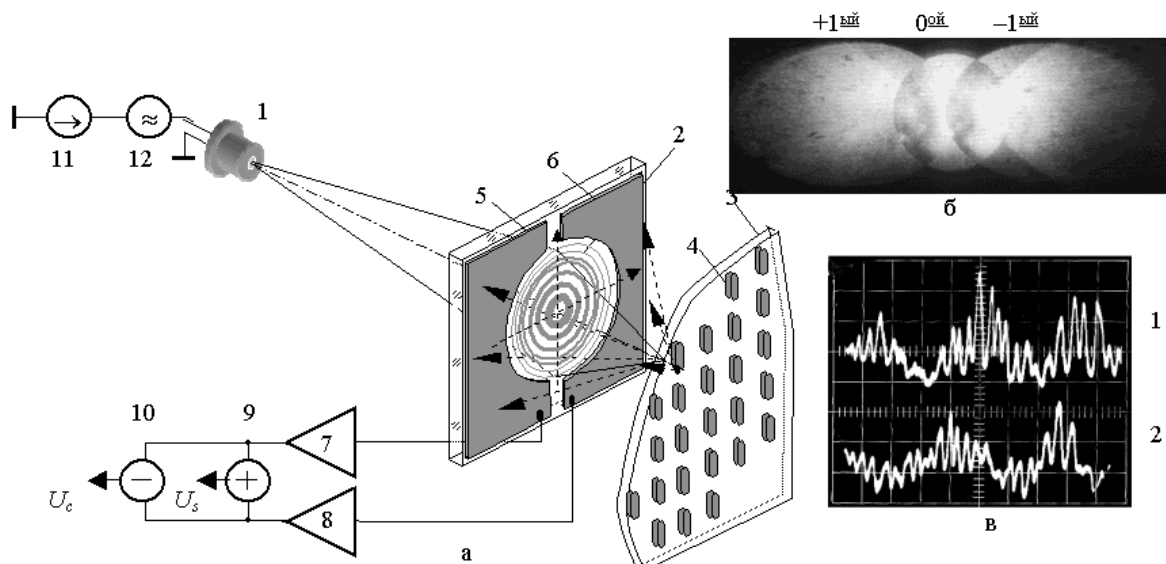


Рис. 5. Схема считывающей головки с дифракционным фокусирующим объективом и кольцевым фотоприемником

Обращение к дифракционной оптике потребовало пересмотра концепции построения оптических схем СГ. В предлагаемой нами системе [13] осуществлено пространственное разделение каналов подсветки диска и считывания информации. Из рис. 5 видно, что СГ состоит всего из двух оптических элементов: полупроводникового лазера 1 оптической пластины с дифракционной линзой 2 и фотоприемниками 5 и 6.

Такая головка по своим характеристикам (размеры, масса) не уступала СГ [14], выполненной в виде интегральной микросхемы. Считывающие фотоприемники 5, 6 имеют кольцевую форму и установлены коаксиально с дифракционной линзой 2. Разделение фотоприемника на отдельные сектора (два или четыре) обеспечивает получение электрических сигналов слежения за дорожкой и автоматической фокусировки. В отсутствие информационных «питов» 4 свет зеркально отражается от поверхности 3. Когда считывающее пятно пересекает пит, световой поток дифрагирует на нем и рассеивается в значительный телесный угол (рис.5 (б)). Дифрагированный поток (штриховые линии на рис. 6) воспринимается кольцевым фотоприемником, сектора 5 и 6 которого, через буферные усилители 7 и 8 соединены с суммирующим и вычитающим устройствами.

На выходах последних формируется соответственно информационный сигнал и сигнал слежения за дорожкой. При отсутствии питов, световой поток к фотоприемнику не поступает, поэтому глубина модуляции информационного сигнала стремится к 100%. Для устранения оптической обратной связи в цепи 11 питания лазера установлен высокочастотный генератор с частотой значительно выше частоты информационного сигнала. На рис. 6в приведены осциллограммы суммы и разности сигналов фотоприемников 5 и 6 полученные на макете СГ с бинарной дифракционной асферической линзой имеющей диаметр 2,8 мм и фокусное расстояние 3 мм. Линзы для СГ изготавливались методом про-

екционной фотолитографии с мультипликацией на стандартных пластинах 127 x127 x2,5 мм и последующим травлением ионным пучком. Типичная дифракционная эффективность составляла 30-35%.

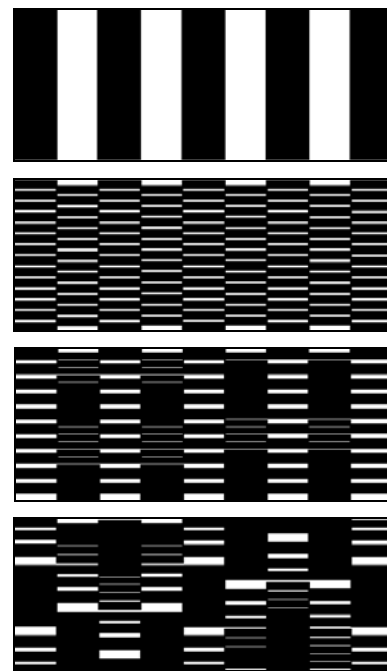


Рис. 6. Переход от растровых шкал к растрово-дифракционным

### 3.5. Измерение угла поворота с помощью дифракционных угловых шкал

Для контроля угловых перемещений различных объектов широкое применение находят датчики на основе прецизионных круговых шкал. Устройства прямой лазерной записи с круговой либо спиральной разверткой экспонирующего луча позволяют эффективно синтезировать не только структуру простых традиционно используемых растровых круговых шкал, но и достаточно сложных шкал со специальной топологией. При-

менение таких шкал обеспечивает получение качественно новых свойств, что способствует улучшению технических характеристик датчиков на их основе. Примером новых шкал со специальной структурой являются радиальные решетки и кодовые диски с растрово-дифракционными топологическими элементами [15]. Путем дополнительного растривания в радиальном направлении элементарные амплитудные топологические элементы обычных шкал (рис. 6 (а)) трансформируются в одномерные дифракционные решетки с различным фазовым сдвигом (рис. 6 (б)) либо с различной пространственной частотой штрихов в радиальном направлении (рис. 6 (в)). По другому варианту указанные элементарные решетки могут быть выполнены в виде фрагментов фокусирующих цилиндрических зонных пластинок Френеля с различным осевым смещением (рис. 6 (г)). С целью повышения световой эффективности, элементарные решетки либо фрагменты зонных пластинок выполняются чисто фазовыми и могут иметь киноформный профиль. При локальном считывании информации, в тангенциальном (угловом) направлении такие структуры действуют как растровые и осуществляют модуляцию света, а в радиальном направлении они действуют как дифракционные и осуществляют фазовый сдвиг, отклонение и/или фокусировку света.

При многодорожечном кодировании информации на шкале и выполнении растрово-дифракционных топологических элементов в виде фрагментов зонных пластинок со смещенными оптическими центрами, фокусирующе-отклоняющее свойство элементов позволяет организовать распределенные и перекрестные оптические связи между кодовыми дорожками и фотоприемниками системы считывания. Это позволяет повысить информационную емкость шкал и снизить количество кодовых дорожек на них. На рис. 7 приведена схема фотоэлектрического датчика абсолютного углового положения с применением растрово-дифракционной кодовой шкалы и организацией перекрестных оптических связей.

В состав датчика входит лазерный диод 1, цилиндрическая линза 2, круговая кодовая шкала 3, вторая цилиндрическая линза 4, фотодиодная линейка 5, аналого-цифровой преобразователь 6 и согласующий дешифратор 7. Кодовая шкала механически связывается с валом датчика (на схеме не отображен), угол поворота  $\varphi$  которого требуется контролировать. Свет от лазерного диода проходит первую цилиндрическую линзу и фокусируется на поверхности кодовой шкалы (в плоскости  $xy$ ) в виде узкой световой линии, ориентированной в радиальном направлении  $r$ . Элементарные топологические участки кодовых дорожек 8 оптической шкалы выполнены в виде фрагментов зонных пластинок со смещенными оптическими центрами и обеспечивают отклонение и одновременную фокусировку света в радиальном направлении. При числе кодовых дорожек равно  $Q$  и числе фотозащитных элементов  $P$ , а также при условии равномерности светового потока между кодовыми дорожками, максимальное значение информационной емкости будет равно

$$C_Q^P = (P + Q)! / [P! Q!],$$

при условии, что каждым фотозащитным элементом регистрируется от 0 до  $P$  уровней интенсивности оптических сигналов от кодовых дорожек.

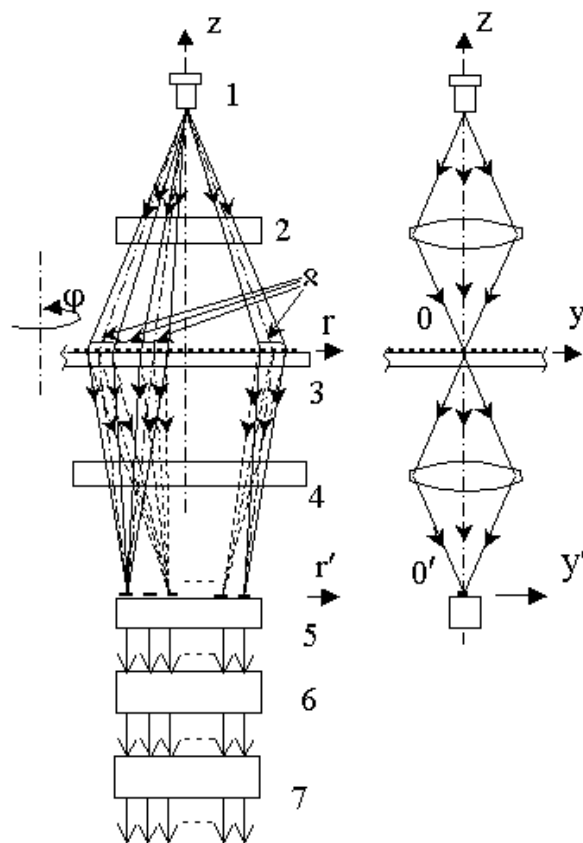


Рис. 7. Схема датчика абсолютного углового положения с растрово-дифракционной кодовой шкалой и перекрестными оптическими связями

### 3.6. Измерение формы фазовых объектов

Свойство ЗП формировать несколько волновых фронтов было использовано при создании простого интерферометра (рис. 8) с общим ходом измерительного и опорного пучков [10]. Интерферометр предназначен для контроля асимметричных фазовых объектов. Плоский волновой фронт  $W$  поступает на ЗП Френеля 1 и дифрагирует на ней. Волновой фронт нулевого порядка дифракции проходит исследуемый объект 2 и искажается, приобретая его форму. Задняя фокальная плоскость ЗП 1, передняя фокальная плоскость линзакона 3 и плоскость фазового объекта совмещаются. Световой пучок  $+1^{то}$  порядка дифракции от ЗП 1 проходит объект без искажений и поступает к линзакону 3, дифрагирует на нем таким образом, что волновой фронт на его выходе в  $+1^{ом}$  порядке дифракции образует коническую волну  $W_2$ . За линзаконом 3, прошедший фазовый объект 2 волновой фронт нулевого порядка дифракции  $W_1$  интерферирует с конической волной  $W_2$ , формируя кольцевые полосы равной ширины. Картина круговых интерференционных полос, искаженных фазовым объектом (стеклянная пластина с дефектом), показана на рис. 8 (б). Характеристики фазового объекта легко интерпретируются.

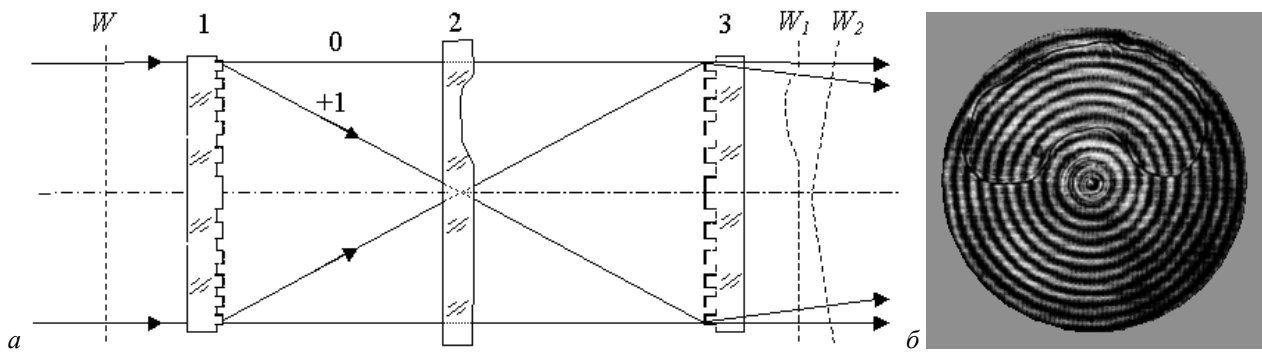


Рис. 8 Интерферометр для измерения формы волнового фронта (а) и интерферограмма (б)

### 3.7. Контроль формы асферических волновых фронтов

Сферические и плоские оптические поверхности контролируются классическими методами [16] с использованием интерферометров, теневых приборов или пробных стекол. В настоящее время широкое распространение получила асферическая оптика, используемая начиная от микрообъективов в СГ лазерных проигрывателей и кончая гигантскими параболическими зеркалами больших телескопов. Методы аттестации асферических поверхностей основаны на создании асферических эталонных волновых фронтов, форма которых соответствует контролируемой поверхности [1]. В классической оптике эта задача решается с помощью компенсационных объективов (нуль-линза). Создание компенсационного объектива – сложная задача. Для асферических зеркал с большой апертурой и светосилой требуются большие диаметры и толщины компенсирующих линз. Поэтому, даже очень маленькие ошибки ( $\sim 10^{-7}$ ) показателя преломления стекла и погрешности юстировки приводят к появлению значительной погрешности измерения. Решить эту проблему можно, заменив рефракционные линзы на дифракционные элементы или синтезированные голограммы.

### 3.7.1 Сертификация компенсационных объективов с помощью ДОЭ

Большие главные зеркала телескопов проверяются интерферометрически из центра кривизны используя нулевые компенсаторы (рис. 9 (а) [17]. Компенсатор, или нулевая линза компенсирует асферичность поверхности зеркала и позволяет производить точные и высокоразрешающие измерения всей поверхности. Для проверки 6,5 метрового главного зеркала телескопов ММТ и “Magellan” в Стюардсовской Обсерватории был разработан компенсатор, состоящий из трех линз из стекла ВК7: силовой линзы 1 и двух полевых линз 2 и 3 (рис. 9 (б) [18]. Расчеты показали, что компенсатор требует высокоточной и стабильной юстировки всех линз с точностью 5 мкм. Однако всегда существует вероятность, что даже точно изготовленный компенсатор может давать ошибку. Если ее вовремя не определить, эта ошибка приведет к неправильной форме главного зеркала. В последние годы для нескольких телескопов были изготовлены главные зеркала неправильной формой из-за ошибок в компенсаторах [19]. Для сертификации компенсатора 6,5 метрового зеркала была использована синтезированная голограмма, которая воспроизводила волновой фронт, отражаемый от главного зеркала с идеальной формой.

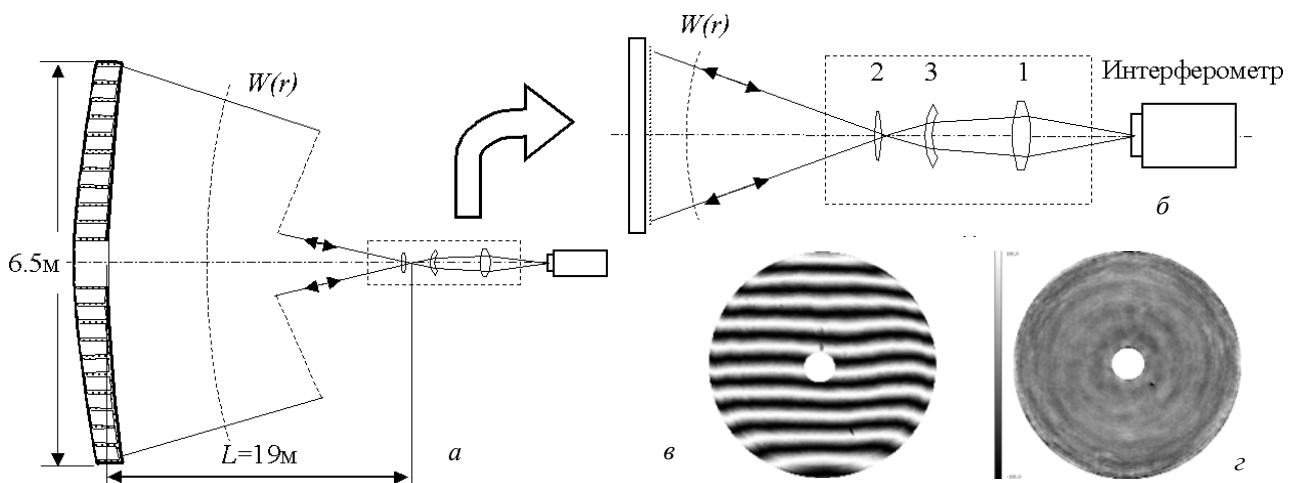


Рис. 9. Схема контроля 6.5 м главного зеркала телескопа с помощью компенсатора (а), схема голографического контроля самого компенсатора (б) и результаты контроля компенсатора (в) и главного зеркала телескопа “Magellan” (z)

Так как компенсатор и голограмма изготавливались независимо, отсутствие ошибок с высокой вероятностью показывает, что компенсатор изготовлен правильно. Синтезированная голограмма для контроля компенсатора была изготовлена в ИАиЭ СО РАН методом прямой лазерной записи по термохимической технологии. Голограмма диаметром 136 мм имела около 32000 концентрических колец и была записана на  $\lambda/20$  кварцевой подложке. Минимальная ширина кольцевой зоны составила 0.8 мкм. Точность выполнения структуры составила 0.1 мкм. Результаты измерения компенсатора [20], приведенные на рис. 9 (в), показали наличие сферической aberrации 17 нм и нерегулярности поверхности 12 нм. Это находится в согласии с расчетными допусками (соответственно 22 нм и 21 нм). Компенсатор был успешно использован для проверки двух 6,5-м зеркал. На рис. 9 (в) приведена карта волнового фронта главного зеркала телескопа “Magellan” имеющего 14 нм ошибки формы поверхности, после коррекции астигматизма.

### 3.7.2. Гибридный дифракционный компенсирующий объектив

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются как альтернатива обычным рефракционным или отражающим компенсационным системам [21, 22].

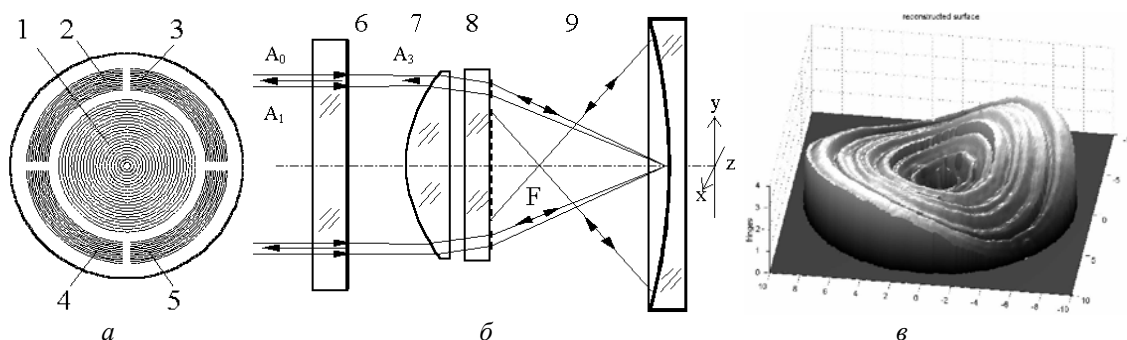


Рис. 10. Гибридная компенсационная измерительная система: дифракционный пятисекционный элемент (а), схема контроля асферической поверхности (б) и результаты измерения формы поверхности (в)

Параллельный пучок когерентного света с амплитудой  $A_0$  из интерферометра Физо проходит эталонную пластину 6 (при этом часть света с амплитудой  $A_1$  отражается назад) и преломляется на сферической поверхности линзы 7, как показано на рис. 10 (б). Так как первая поверхность компенсатора сферическая, отраженный назад, в интерферометр, свет минимален. В 2-м и 5-м секторах расположены вспомогательные отражательные ДОЭ, рассчитанные таким образом, что дифрагированный световой поток с амплитудой  $A_3$  возвращается точно назад и интерферирует с волной  $A_1$  (рис. 10 (а)). Во 3-м и 4-м секторах расположены вспомогательные ДОЭ, рассчитанные таким образом, что дифрагированный световой пучок с амплитудой  $A_4$  фокусируется точно в центр кривизны контролируемой асферической поверхности. Затем этот пучок отражается назад, интерферируя с волной  $A_1$ . Линза 7 и ДОЭ 1 преобразуют плоский входной волновой фронт в асферический, форма которого совпадает с теоретической формой контролируемой поверхности 9.

Однако при аттестации высокоапертурной асферической оптики ( $f/3-f/0.7$ ), дифракционные однокомпонентные компенсаторы имеют малые размеры дифракционных зон и ошибки изготовления уменьшают точность измерения. Использование комбинации рефракционных и дифракционных элементов позволяет улучшить свойства нулевой системы. Качество интерференционной картины зависит от точности юстировки дифракционного и рефракционного элементов друг относительно друга. Обычные классические методы юстировки не позволяют получить требуемую точность, и эти ошибки могут стать главным ограничением для применения таких гибридных систем. Поэтому была разработана и исследована гибридная компенсационная система [23], состоящая из сферической плоско-выпуклой линзы и ДОЭ, которые используются совместно с обычным интерферометром Физо для проверки асферических поверхностей. Компенсатор состоит из двух элементов: плоско-выпуклой сферической линзы и плоско-параллельной оптической подложки (рис. 10 (а) с несколькими аксиально-симметричными ДОЭ. В центральной части располагается главный ДОЭ 1, а по бокам (четыре сектора) располагаются вспомогательные ДОЭ (2, 3, 4 и 5), которые служат для взаимной юстировки гибридной системы и контролируемой асферической поверхности.

При этом все лучи, выходящие из компенсирующей системы, направлены по нормальям к асферической поверхности. Если поверхность идеальна, то отраженные лучи после обратного прохождения через дифракционный элемент и линзу вновь образуют плоскую волну, которая интерферирует с плоской волной сравнения. Отступление поверхности от идеальной формы измеряется по искривлению интерференционных полос. Главный 1 и вспомогательные 3, 4 ДОЭ имеют бинарный фазовый рельеф, что обеспечивает пропускание компенсатора около 16% при двойном проходе. Видность интерферограммы вполне достаточна для аттестации оптики с коэффициентом отражения от  $\rho=1$  до 100% и достигает максимума при  $\rho=20\%$ . На рис. 10 (в) приведены результаты измерения (карта ошибок волнового фронта) асферического зеркала  $f/1,5$ , полученные с помощью интерферометра Zygo. Гибридный компенсатор состоял из плосковыпуклой линзы с диаметром  $d=36$  мм и пяти ДОЭ, расположенных на кварцевой пластине.

### 3.7.3. Внеосевой дифракционный компенсатор

Компенсаторы на основе *осесимметричных* ДОЭ наиболее просты в расчете и изготовлении. Однако их практическое применение имеет ряд весьма серьезных ограничений, связанных с зеркальным отражением света от подложки и наличием нежелательных дифракционных порядков, распространяющихся вдоль оптической оси интерферометра. Эти блики могут существенно ис-

казать результаты измерений. Обычные методы борьбы с бликами - небольшие наклоны подложки с ДОЭ, крайне нежелательны, так как приводят к появлению значительных aberrаций [24]. Один из путей устранения бликов – применение гибридных систем, был рассмотрен выше. Другой радикальный путь устранения бликов - наклон пластины с ДОЭ на угол  $\alpha=0,5-1^\circ$  и соответствующий излом оптической оси измерительной системы, как показано на рис. 11 (а).

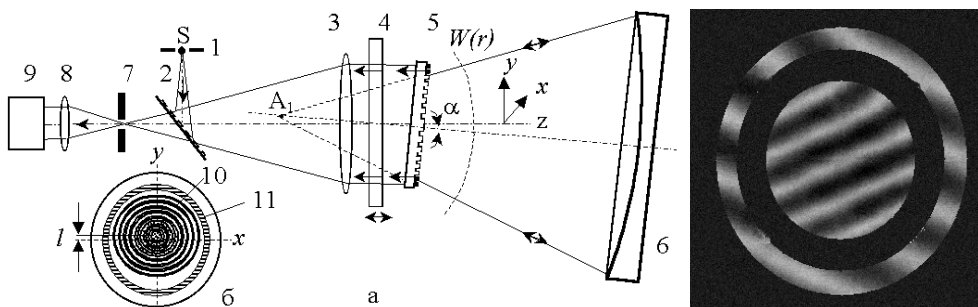


Рис. 11. Расположение дифракционных элементов на пластине (а), оптическая схема интерферометра Физо с внеосевым дифракционным компенсатором (а), интерферограммы, полученная с помощью цилиндрического внеосевого ДОЭ (в)

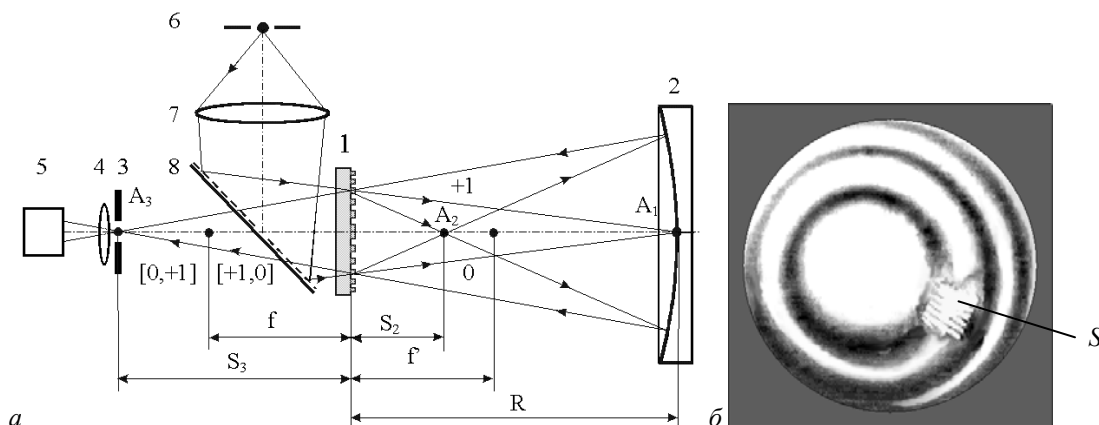


Рис. 12. Схема дифракционного интерферометра с общим ходом опорного и измерительного пучков (а) и интерферограмма сферического зеркала  $f/D=4.5$  полученная с источником белого света (б)

Световой поток от источника света 1 (лазера) отражается от светоделителя 2, коллимируется объективом 3 и проходит эталонную оптическую пластину 4. Часть светового пучка, отраженная от внешней поверхности пластины, образует опорный пучок, а другая, прошедшая - измерительный. Прошедший пучок преобразуется ДОЭ в расходящийся (или сходящийся) асферический пучок, лучи которого падают и отражаются по нормали от контролируемой поверхности 6. На обратном пути оба пучка (опорный и измерительный) проходят светоделитель 2, диафрагму 7, объектив 8 и образуют интерференционную картину в плоскости видеокамеры 9. Плоскости ДОЭ и контролируемой поверхности 6 расположены под небольшим углом ( $\alpha=0,5-1^\circ$ ) к оптической оси. Величина этого угла должна быть достаточна для блокировки нежелательных дифракционных порядков и бликов. Точность установки пластины с ДОЭ в заданную плос-

кость должна быть не хуже 10-15 угловых секунд. Для контроля правильности положения, основной ДОЭ 10 (рис. 11 (б)) окружается кольцевой зоной 11 с линейной амплитудной решеткой, штрихи которой ориентированы вдоль оси  $x$ . Период штрихов берется  $T=\lambda/2\alpha$ . В этом случае, установленная под углом  $\alpha$  решетка возвращает свет точно назад, и в плоскости видеокамеры будет наблюдаться составная интерференционная картина, аналогичная приведенной на рис.12 (в). Внешнее интерференционное кольцо формируется отражающей решеткой 10, а центральная часть принадлежит контролируемой поверхности. Погрешность установки пластины при контроле по интерферограмме составляет  $\delta=\lambda N/2D$ , где  $D$  - диаметр кольцевой зоны 11,  $N$  - число наблюдаемых полос. В примере на рис. 12 (в), диаметр  $D=40$  мм и погрешность установки ДОЭ от расчетной позиции составляла менее 10 угловых секунд.



### 3.7.4 Дифракционный интерферометр с общим ходом опорного и измерительного пучков

Зонная пластинка является основным оптическим элементом дифракционного интерферометра с общим ходом опорного и измерительного пучков. Выполняя роль синтетического пробного стекла, ЗП формирует опорный волновой фронт. Интерес к таким интерферометрам обусловлен: возможностью создания интерферометра без применения высококачественных и дорогих объективов и разделительных пластин; существенным снижением влияния вибраций и температурных колебаний; возможностью применения не монохроматичных и протяженных источниках излучения.

Интерферометр состоит из двух основных элементов – зонной пластинки 1 и контролируемой поверхности 2. В наблюдательную часть входит диафрагма 3, объектив 4 и видеокамера 5. В интерферометр поступает сходящийся пучок света от источника 6 через линзу 7 и светоделительную пластинку 8. Часть пучка, образующая опорную волну, проходит через зонную пластинку без отклонения (нулевой порядок дифракции) и фокусируется в центре зеркала в точке  $A_1$ . Другая часть, образующая измерительную волну, дифрагирует в +1-й порядок и фокусируется в точке  $A_2$ . После отражения от зеркала оба пучка собираются в точке  $A_3$ , при этом опорный пучок дифрагирует в +1-й порядок, а измерительный проходит без отклонения. После объектива 4 опорный [0, +1] и измерительный [+1, 0] пучки рекомбинируют, образуя в плоскости видеокамеры 5 интерференционную картину, несущую информацию о форме поверхности зеркала. Если расстояние между зонной пластинкой и зеркалом точно равно радиусу кривизны, то расстояния точек  $A_2$  и  $A_3$  от зонной пластинки равны соответственно:

$$S_2 = fR/(R+f) \text{ и } S_3 = fR/(R-f),$$

где  $f$  – фокусное расстояние ЗП,  $R$  – радиус кривизны исследуемого зеркала 2.

Интерферирующие пучки нулевого и +1 порядков происходят из одного первичного луча, поэтому полосы могут наблюдаться при протяженном источнике и в белом свете, поскольку разность хода интерферирующих пучков, близка к нулю. Выходная диафрагма 3 выполняет функции спектрального фильтра. Экспериментально исследовался интерферометр с амплитудными и фазовыми ЗП, имеющими  $f=25, 50$  и  $100$  мм и диаметр  $10-25$  мм. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер (650 нм) и лампа накаливания (КГМ). На рис. 12 (б) приведена интерферограмма сферического зеркала  $f/D=4,5$  полученная с источником белого света. Для наглядности, на интерферограмме оставлено изображение S спирали лампы 6. Для наглядности, на интерферограмме оставлено изображение S спирали лампы 6. Обычно это изображение отфильтровывается. Использование «белого» источника света, позволят получить высококонтрастную интерферограмму без спеклов.

### **Заключение**

В настоящей работе было рассмотрено только несколько областей использования ДОО в оптической метрологии, но широкие возможности ДОО далеко не исчерпываются этими областями. За пределами нашего обзора остались применения дифракционной оптики для измерения линейных перемещений, офтальмологических и медицинских измерений, спектроскопии, конфокальной микроскопии и т.д., выполненных в ИАиЭ СО РАН.

Развитие технологической базы производства дифракционных элементов обеспечивает в настоящее время возможность создания как бинарных, так и многоуровневых элементов с высокой дифракционной эффективностью. Изготовление элементов в полярной системе координат оказалось продуктивным и выявило ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными  $x-y$  системами. Благодаря непрерывному сканированию по угловой координате существенно повышена скорость записи, снижен шум квантования, характерный для  $x-y$  систем, сокращен объем данных, необходимый для описания элементов с круговой симметрией. Точность воспроизведения формы волнового фронта СГ достигла  $\lambda/20$ , что соответствует наивысшим стандартам классической оптики.

Таким образом, развитие дифракционной оптики фактически выходит на уровень, когда она станет таким же неотъемлемым компонентом оптических измерительных систем, как лазеры и микропроцессорная техника. Технологически реальная интегрируемость полупроводниковых лазеров, дифракционных и волноводных элементов с микросхемами открывает возможность создания микро-оптоэлектронных измерительных систем для широкого класса задач.

### **Литература**

1. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. - М.: Физматлит, 2000.
2. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Михальцова И.А., Пальчикова И.Г., Полещук А.Г. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия, 1985, №1. С. 4-21.
3. A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt., 1999. **38**. P. 1295-1301.
4. V.V. Cherkashin, E.G. Churin, V.P. Korolkov, V.P. Kooronkevich, A.A. Kharissov, A.G. Poleshchuk, J.H. Burge Processing parameters optimisation for thermochemical writing of DOEs on chromium films // SPIE. 1997, **3010**. P. 168-179.
5. J.H. Burge, L.R. Dettmann, S.C. West Null correctors for 6.5-m  $f/1.25$  paraboloidal mirrors. Fabrication and Testing of Aspheres, OSA Trends in Optics and Photonics // Optical Society of America, Washington, DC. 1999. Vol. 24. P. 182-186.

6. M.T. Gale, M. Rossi, R. Kuns, G.L. Bona Fabrication of continuous - relief micro- optical elements by direct laser writing in photoresist // Opt. Eng.-1994. **33**. P. 3556-3566.
7. G. Neugebauer, R. Hauck, O. Bryngdahl Computer-generated holograms: carrier of polar geometry // Appl. Opt., 1985. **24**. P. 777-784.
8. G.M. Morris, D. Faklis Achromatic and apochromatic diffractive singlets //Diffractive Optics: Design, Fabrication and Application. Conference, Rochester, N.Y., 1994. P. 53.
9. J.H. Burge Application of computer-generated hologram for interferometric measurement of large aspheric optics // SPIE, 1995, **2576**, pp.258-269.
10. V.P. Koronkevich, I.A. Mikhaltsova, E.G. Churin, Yu.I. Yurlov Lensacon // Appl. Opt., 1995. **34**. P. 5761-5772.
11. G. Hausler, W. Heckel Light sectioning with large depth and high resolution // Appl. Opt., 1989. **28**. P.682-686.
12. Коронкевич В.П., Пальчикова И.Г., Полещук А.Г. Бифокальный микроскоп с киноформными // Автометрия, 1987, №6. С. 15-22.
13. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Пальчикова И.Г. Считывание информации с компакт дисков лазерной головкой с дифракционной оптикой // Квантовая электроника, 1988. **15**. № 10. С. 2128-2134.
14. W. Osamu Resent progress in optoelectronic integrated circuits // IEEE Quantum Electron. 1988. No. 10.
15. A.G. Sedukhin Diffraction reticles: The capabilities of novel optical components for displacement or distance measurement // Optik, 1990. **85**. P. 47-52.
16. Малакара Д. Оптический производственный контроль // Москва, Машиностроение, 1985.
17. Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографические методы контроля асферических поверхностей // ОМП, 1979. №4. С. 53-59.
18. J.H. Burge, *et al.* Null test optics for the MMT and Magellan 6.5-m  $f/1.25$  primary mirrors // SPIE 1994. **2199**. P. 658-669.
19. L. Allen, J.R. Angel, J. Mongus etc. The Hubble Space Telescope optical system failure report // NASA report (NASA, Washington, D.C., November 1990).
20. J.H. Burge, L.R. Dettmann, S.C. West. Null correctors for 6.5-m  $f/1.25$  paraboloidal mirrors. Fabrication and Testing of Aspheres , OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 24, (Optical Society of America, Washington, DC 1999) pp. 182-186.
21. Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографические методы проверки асферических поверхностей // Опико-механическая промышленность. 1979. №4. С. 53-59.
22. S.M. Arnold, R. Kestner Verification and certification of CGH aspheric nulls // SPIE, 1995, **2536**. P. 117-126.
23. Полещук А.Г., Чурин Е.Г., Корольков В.П Гибридная рефракционно-дифракционная нулевая система для интерферометрического контроля светосильных асферических поверхностей // Компьютерная оптика (Самара), 2000. **20**. С. 76-79.
24. C. Pruss, S. Reichelt, H. Tiziani, V.P. Korolkov Preliminary results in investigation of diffractive high-efficiency objective for laser interferometry // Компьютерная оптика, 2002.