

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

В.К.Кирилловский, Е.В.Гаврилов

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

**Часть 7. Инновационные методы контроля
при изготовлении прецизионных асферических
поверхностей**

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2009

УДК 535.317.2.

В.К.Кирилловский, Е.В.Гаврилов. Оптические измерения. Часть 7. Инновационные методы контроля при изготовлении прецизионных асферических поверхностей. СПб ГУ ИТМО. 2009.- 118 с.

В Части 7 рассматриваются инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем, приведены современные методы контроля при формообразовании асферических поверхностей.

В пособии показаны новые аппаратурные и программные решения, ставшие базой для комплекса компьютеризированных методов оптического контроля и исследований асферических поверхностей. Показаны новые пути применения компьютеров в оптическом приборостроении, при измерениях и контроле aberrаций и качества прецизионных систем, включая системы для нанотехнологий.

Пособие направлено на подготовку студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200200 – Опотехника и оптическим специальностям, бакалавров, магистров и дипломированных специалистов.

Рекомендовано:

Председатель УМС по направлению подготовки Опотехника и оптическим специальностям, д.т.н., профессор Э.С.Путилин. Протокол №3 от 29.04.09 заседания Президиума Совета УМО.



Председатель Совета УМО по образованию в области приборостроения и опотехники, ректор СПбГУ ИТМО, д.т.н, профессор В.Н.Васильев.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и опотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки Опотехника и оптическим специальностям.

Учебное пособие: Оптические измерения. Часть 7. Инновационные методы контроля при изготовлении прецизионных асферических поверхностей.

Авторы – Владимир Константинович Кирилловский
Егор Валерьевич Гаврилов

Издательство: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009

©В.К.Кирилловский, Е.В.Гаврилов, 2009

ВВЕДЕНИЕ

РОЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ АСФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

В наши дни область применения асферических поверхностей непрерывно расширяется в оптических системах различного назначения. В их числе:

- Современная фотографическая оптика.
- Астрономическая оптика.
- Современные зеркальные объективы для нанолитографии.

Асферические поверхности в последнее время все шире применяются в автомобильных осветительных системах, а также в офтальмологии, в частности для создания полифокальных очков (Essilor).

Введение в оптические приборы асферических поверхностей позволяет расширить возможности и область применения приборов, упростить оптические системы при одновременном улучшении их оптических характеристик [1]. Оптические детали с асферическими поверхностями применяются как в сравнительно простых системах, например, фотографических, не требующих предельной точности, так и в прецизионных телескопических, астрономических приборах, в прецизионных системах микрооптики, в комплексах для нанолитографии.

Массовое применение асферических поверхностей ранее было затруднено сложностью их изготовления и особенно контроля, в частности, в случаях, когда требуются поверхности повышенной точности.

Итак, наряду с методами изготовления асферических поверхностей не менее важно иметь и методы контроля их формы, без которых невозможен технологический процесс и изготовление систем, включающих асферические поверхности необходимой сложной формы и точности.

В данном пособии приведены сведения как о широко применяемых, так и о заслуживающих дальнейшего развития методах формообразования и контроля асферических поверхностей. Современные средства оптических измерений третьего поколения используют новые методы извлечения оптико-измерительной информации, дающие принципиально улучшенные результаты. Вновь разработанные принципы, алгоритмическое и программное обеспечение позволили реализовать мощные потенциальные возможности эффективных методов контроля, таких как дифракционные интерферометры, сдвиговая интерферометрия и накопительная изофотометрия. Ряд методов, обладая уникальными точностными и информационными возможностями, не получил ранее широкого практического распространения вследствие сложности мануальной реализации и неразработанности методик расшифровки и интерпретации данных. В пособии показаны новые аппаратные и программные решения, ставшие базой для комплекса компьютеризированных методов оптического контроля и исследований асферических поверхностей, где

указанные методы приобрели новые свойства, эффективность и практическую ценность.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Асферические поверхности, используемые в оптических системах, по оптическим свойствам разделяются на две основные группы [1]:

- поверхности вращения, имеющие ось симметрии;
- поверхности, обладающие двумя плоскостями симметрии.

Первая группа характеризуется общим уравнением меридионального сечения асферической поверхности

$$x = A|y| + By^2 + C|y^3| + Dy^4 + \dots \quad (1)$$

В зависимости от значения коэффициентов $A, B, C, D \dots$ асферические поверхности этой группы могут быть подразделены на подгруппы с различными оптическими свойствами.

В оптических системах обычно используются поверхности плавные, не имеющие точек излома и обладающие параксиальной областью для распространения световых лучей.

Уравнение меридионального сечения таких поверхностей имеет вид

$$x = By^2 + C|y^3| + \dots \quad (2)$$

(где коэффициент $A = 0$).

Обычно используются симметричные поверхности. В уравнении меридиональных сечений для них отсутствуют члены с нечетными степенями:

$$A = C = E = 0.$$

Сюда можно отнести поверхности коррекционных пластин (типа пластин Шмидта) и поверхности 2-го порядка (коникойды). Из поверхностей, не обладающих параксиальной областью, находят применение конические поверхности. Для них уравнение меридионального сечения:

$$x = A|y|.$$

Находят применение торические и цилиндрические поверхности.

Коэффициенты для поверхностей 2-го порядка определяются по формулам

$$B = \frac{1}{2p}, D = \frac{1}{8} \frac{(1-e^2)}{p^3}, F = \frac{1}{16} \frac{(1-e^2)^2}{p^5} \quad (3)$$

где $p = \frac{b^2}{a}$, a – большая полуось поверхности, b – малая полуось поверхности,

Асферические поверхности

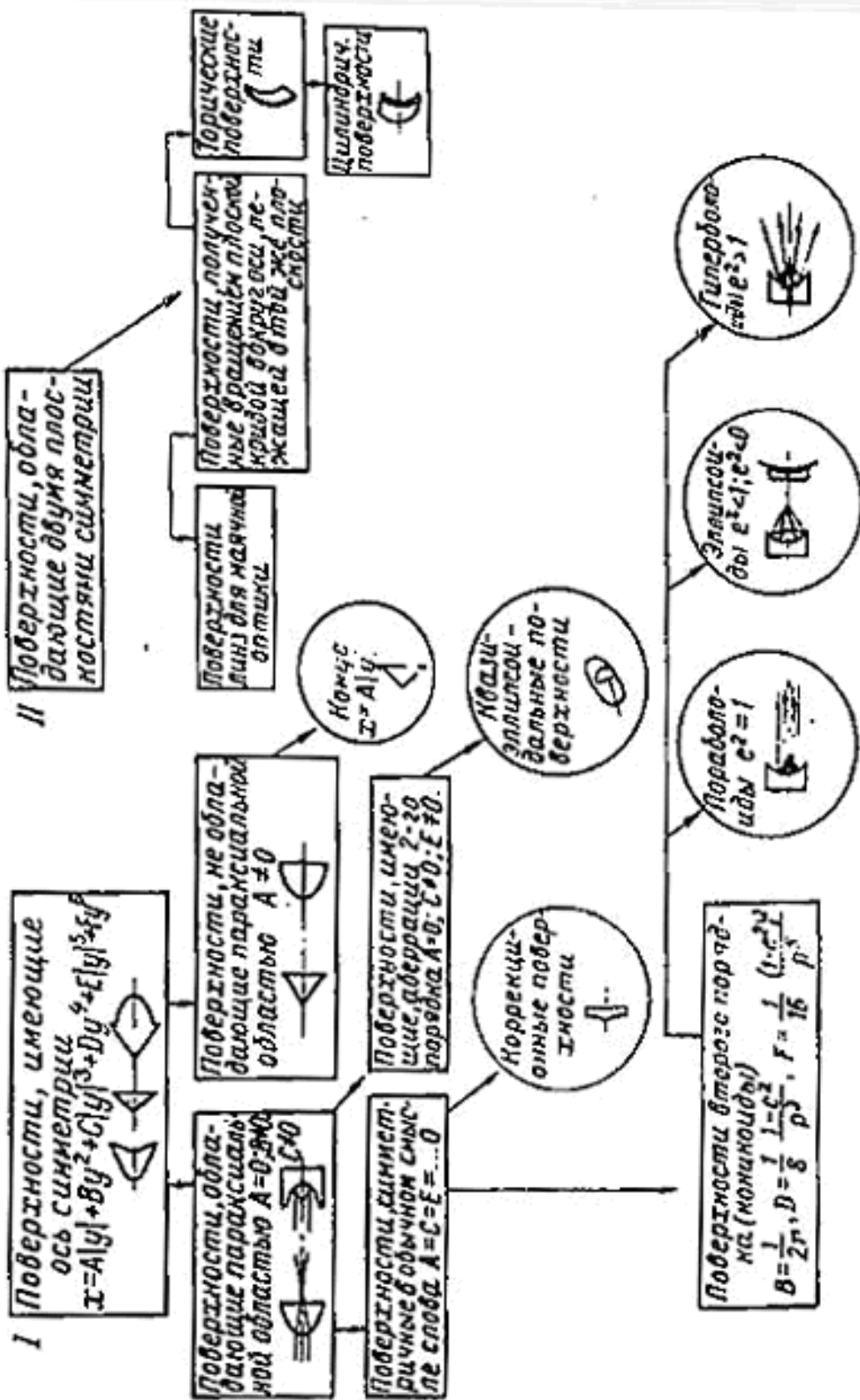


Рис. 1

$$c = \sqrt{a^2 - b^2},$$

$$e = \frac{c}{a}.$$

Классификационная схема асферических поверхностей показана на рисунке 1.

СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Свойства и преимущества асферических поверхностей, используемых в оптических системах, изложены в ряде работ, посвященных расчету оптических систем [2—6]. Далее здесь даны лишь краткие сведения о методах обработки, применяемых при формообразовании асферических поверхностей.

В настоящее время для их получения применяют следующие способы формообразования:

- Точение, фрезерование, шлифовка или полировка.
- Прессование или отливка из пластического или вязкого материала.
- Пластическое изменение формы исходных поверхностей давлением или нагреванием заготовки в определенных пределах.
- Нанесение на исходную поверхность слоя дополнительного слоя вещества, распределенного по поверхности в соответствии с определенным законом, путем напыления, наплавления или нанесением гальванического покрытия.

Свои преимущества и недостатки имеет каждый из этих методов. Выбор способа зависит от ряда факторов, в том числе - от требуемой точности изготавливаемой детали.

Наиболее перспективными из известных способов при массовом изготовлении деталей среднего уровня точности можно считать прессование и полимеризацию из пластических материалов. Основным недостатком этих методов являются ошибки, возникающие из-за усадки материала во время полимеризации или прессования, а также искажение поверхностей с течением времени (в процессе естественного старения). В последние годы эти проблемы во многом успешно решены, что подтверждается широким распространением на рынке любительской фотоаппаратуры с zoom-оптикой хорошего качества, имеющей достаточно простую конструкцию, достигаемую применением полимерных деталей с асферическими поверхностями.

Асферические поверхности, мало отступающие от сферы или плоскости, можно успешно изготавливать путем нанесения прозрачных или отражающих слоев на соответствующие исходные поверхности. Однако при этом надо учитывать, что указанные методы пригодны прежде всего для изготовления зеркал, так как прозрачность наносимых слоев быстро падает с увеличением их толщины, поэтому практически удается изготовить деталь с прочным напыленным слоем толщиной не более чем несколько микрон. Применение этого метода для изготовления зеркал с параболической поверхностью описал Стронг [7].

Наиболее распространенными остаются методы формообразования асферических поверхностей путем шлифовки и полировки заготовок.

Требуемую форму поверхности и ее точность получают последовательным применением полировальных инструментов с различными диаметрами и конфигурацией рабочей поверхности, а также за счет изменения времени обработки, смещения и величины штриха в процессе полировки. При этом форма и точность поверхности периодически контролируются.

Уравнение кривых второго порядка, вершина которых находится в начале координат, имеет следующий вид:

$$y^2 - 2px + (1 - e^2)x^2 = 0, \quad (4)$$

где p — параметр кривой,

e — эксцентриситет.

На рис. 2 дана схема к расчету отступлений кривых 2-го порядка от сферы ближайшего радиуса.

Здесь x_0 и x — абсциссы соответственно для сферы (а) и кривой второго порядка (б);

y_0 и y — ординаты;

$\Delta x = x - x_0$ — отступление кривой второго порядка от сферы ближайшего радиуса при $y_0 = y$.

Раскладывая функцию (4) в ряд и пренебрегая членами начиная с 5-й степени y , получим

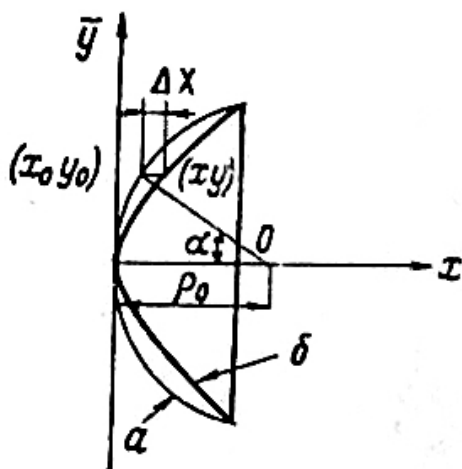


Рис. 2. К схеме расчета отступлений кривых 2-го порядка от сферы ближайшего радиуса

$$\Delta x = x - x_0 = \frac{y^2 e^2}{8p^3} (h^2 - y^2), \quad (5)$$

где h — половина диаметра обрабатываемой детали.



Рис. 3. Трехлепестковая маска

На рис. 3 показан контур инструмента, построенный по расчетным данным.

Методы формообразования асферических поверхностей обычно осуществляются путем шлифовки и полировки заготовок.

Стекло традиционно является (наряду с современными полимерами), основным материалом для изготовления оптических деталей, в том числе и с асферическими поверхностями. Обработка стекла при изготовлении оптических преломляющих или отражающих поверхностей обычно состоит из следующих процессов:

- Точение с помощью обычных токарных или алмазных резцов (этот вид обработки применяется относительно редко).
- Фрезерование с помощью алмазного инструмента.
- Шлифовка свободным абразивом.
- Полировка полировальными порошками.

В отличие от простейших форм поверхностей — сферы и плоскости — асферические поверхности не имеют свойств, позволяющих обрабатывать их «классическим» способом «притира» по всей поверхности с взаимным исправлением обрабатываемой поверхности и инструмента.

Некоторые типы асферических поверхностей допускают обработку с автоматической правкой инструмента, но инструмент при этом может быть только линейным. Сюда относятся параболоиды вращения, торы, конусы и другие линейчатые поверхности. Как правило, при изготовлении асферических поверхностей для достижения необходимой точности требуются специальные приемы и значительная затрата квалифицированного труда.

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Точный шаблон для контроля поверхности вращения второго порядка можно изготовить, вырезав из конуса (выпуклого и вогнутого) наклонную пластинку.

Уравнение сечения кругового конуса 1 (рис. 7) плоскостью 2 при расположении вершины O кривой в начале координат имеет вид

$$y^2 = 2px + (e^2 - 1)x^2 \quad (6)$$

и дает необходимую кривую 3. Величины p и e , определяющие форму кривой профиля плоского шаблона, находят по формулам

$$e = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}, \quad (7)$$

$$p = L \frac{\operatorname{tg} \alpha (\sin^2 \beta - \cos^2 \alpha)}{\cos(\beta + \alpha)}, \quad (8)$$

где L — кратчайшее расстояние по образующей конуса от его вершины до плоскости сечения,

α — половина угла при вершине конуса,

β — угол между секущей плоскостью и основанием конуса.

Для контроля формы шлифованных поверхностей наиболее часто используются различного типа сферометры, с помощью которых измеряют высоты x (стрелки) сегментов поверхности различных зон и, сравнивая их с расчетными, определяют отступления поверхности от заданной формы.

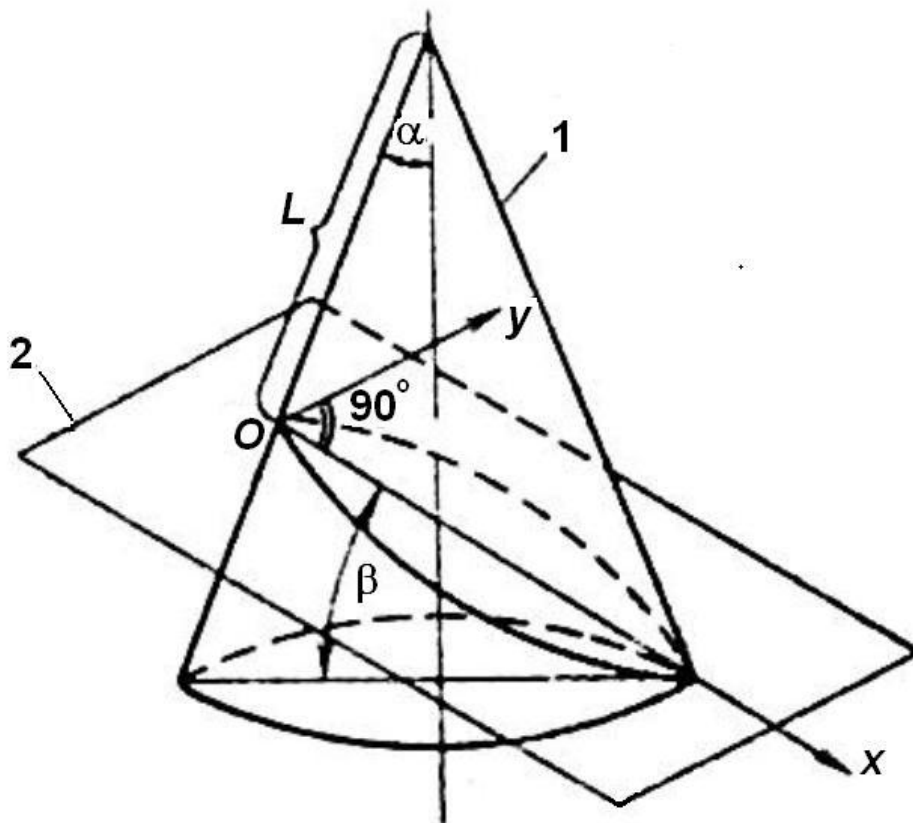


Рис. 4. Сечение конуса плоскостью

Для измерения, например, профиля параболоида с параметром 100 мм с точностью до 0.001 мм, потребуется откладывать величины углов с точностью не менее при 5'' при $\varphi=45^\circ$ и 2'' – для углов в диапазоне от 60° до 90° .

Метод анаберрационных точек для контроля эллиптических, параболических и гиперболических поверхностей

Сущность метода

Поверхности, образованные вращением кривых второго порядка вокруг их оси симметрии имеют полезное свойство: наличие пары анаберрационных точек, являющихся геометрическими фокусами этих кривых. Для сферы обе анаберрационные точки совпадают её центром кривизны. Для эллипсоида, образованного вращением эллипса вокруг его большой оси (рис.8, а), анаберрационные точки F_1 и F_2 расположены по одну сторону от поверхности и на конечном расстоянии друг от друга. Для гиперболоида, образованного вращением гиперболы вокруг оси, проходящей через её вершину, анаберрационные точки расположены по разные стороны от поверхности и на конечном расстоянии друг от друга (рис.8, б). Для параболоида одна анаберрационная точка находится в оптическом фокусе, а другая в бесконечности (рис.8, в). Анаберрационные точки являются оптически сопряженными лишь для отражающих поверхностей.

Если поверхность имеет идеальную форму и точечный источник света расположен точно в одном из геометрических фокусов, то отраженные от поверхности лучи образуют сферический волновой фронт, центр кривизны которого совпадает с другим геометрическим фокусом. Различные методы контроля, основанные на использовании анаберрационных точек, по существу сводятся к исследованию тем или иным способом волнового фронта, образованного отраженными от поверхности лучами. Способы исследования волнового фронта могут быть весьма разнообразными и основываться на различных законах геометрической оптики (обычно это теневой метод Фуко, метод Гартмана или интерферометрия).

Интерференционные методы исследования волнового фронта требуют, как правило, создания автоколлимационной схемы при помощи технологического плоского или сферического зеркала, центр кривизны которого совмещается с одним из геометрических фокусов контролируемой поверхности. В другом фокусе поверхности располагается точечный источник света или его изображение. На рис. 9 показаны различные автоколлимационные схемы для выпуклых и вогнутых поверхностей вращения второго порядка.

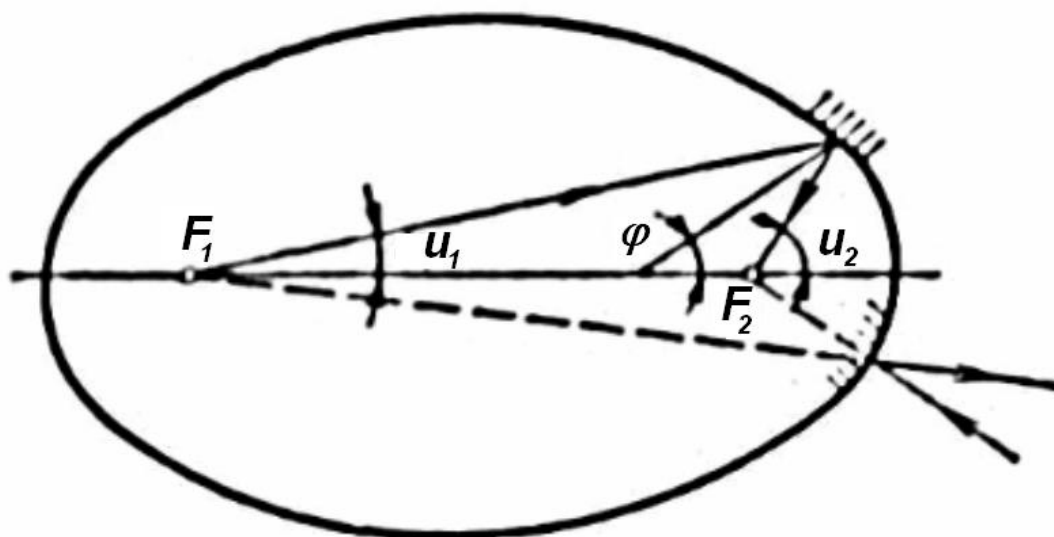


Рис. 5. Анаберрационные точки F_1 и F_2 отражающих поверхностей второго порядка: эллиптических

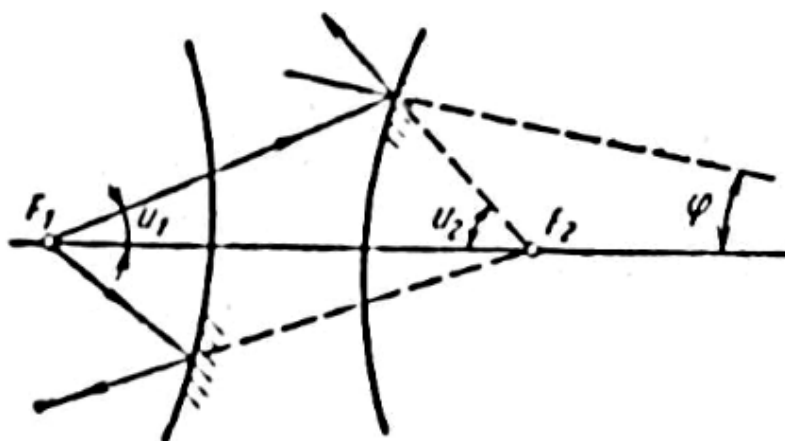


Рис. 6. Анаберрационные точки F_1 и F_2 отражающих поверхностей второго порядка: гиперболических

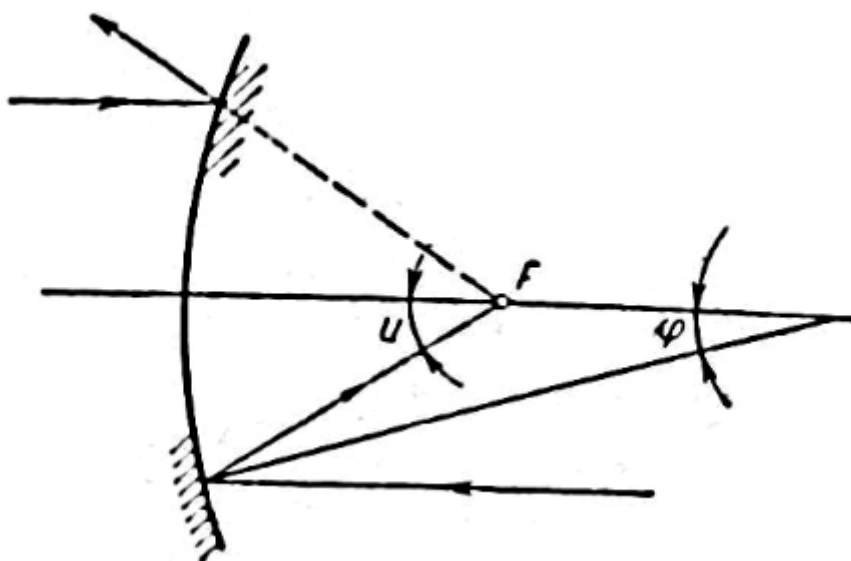


Рис. 7. Анаберрационные точки F_1 и F_2 отражающих поверхностей второго порядка: параболических

Исследование волнового фронта, отраженного от контролируемой поверхности 1, сводится к определению его деформации, т.е. отступления от сферической формы. Деформация волнового фронта может возникнуть как в результате ошибок изготовления самой поверхности, так и в результате неточности совмещения точечного источника света F' , создаваемого объективом 3, или центра кривизны C сферического автоколлимационного зеркала 2 с геометрическими фокусами F_1 и F_2 поверхности (расфокусировки).

Если интерференционная картина, возникающая при участии контролируемой поверхности и 2, будет обусловлена погрешностями поверхности автоколлимационного зеркала и расфокусировкой, то достоверных заключений о качестве поверхности сделать нельзя, так как при анализе интерференционной картины не отличить погрешности изготовления поверхности от погрешностей её установки.

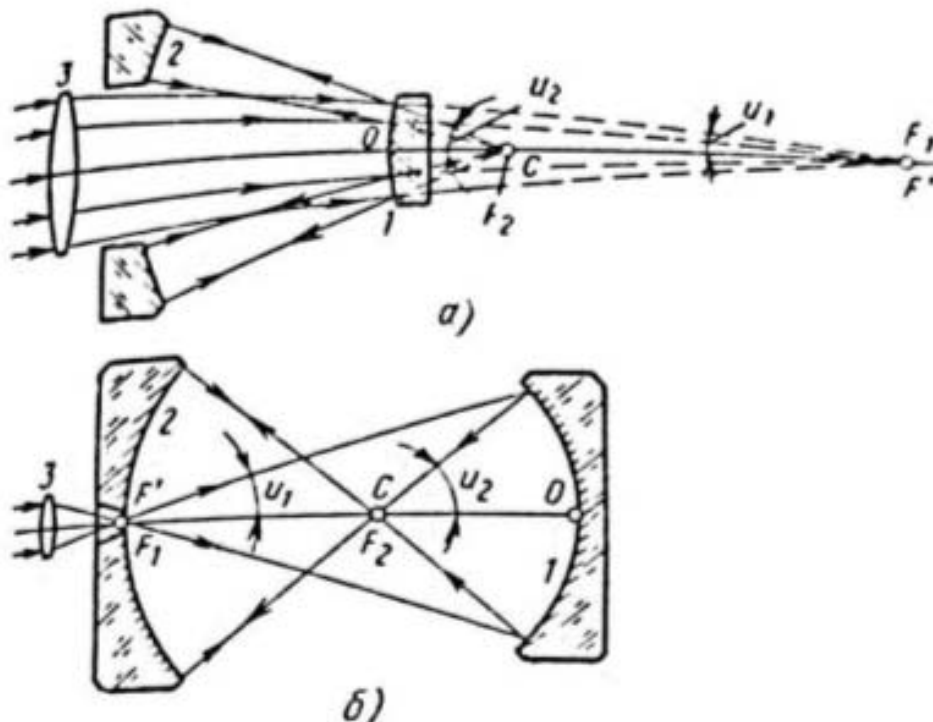


Рис. 8. Автоколлимационные схемы для контроля асферических поверхностей второго порядка:

а, б, - выпуклых и вогнутых эллиптических,

Поэтому прежде чем проектировать какой-либо прибор, основанный на использовании геометрических фокусов, необходимо установить, с какой точностью требуется совмещать источник света и центр кривизны автоколлимационного зеркала с геометрическими фокусами поверхности. Этот вопрос является основным в методах контроля, использующих анаберрационные точки поверхностей вращения второго порядка, поскольку он определяет практическую осуществимость метода и трудности, связанные с его

использованием. Специальное исследование показало, что требования к точности указанных совмещений зависят от эксцентриситета поверхности второго порядка и апертурных углов в её геометрических фокусах, которые являются анаберрационными, но не апланатическими точками.

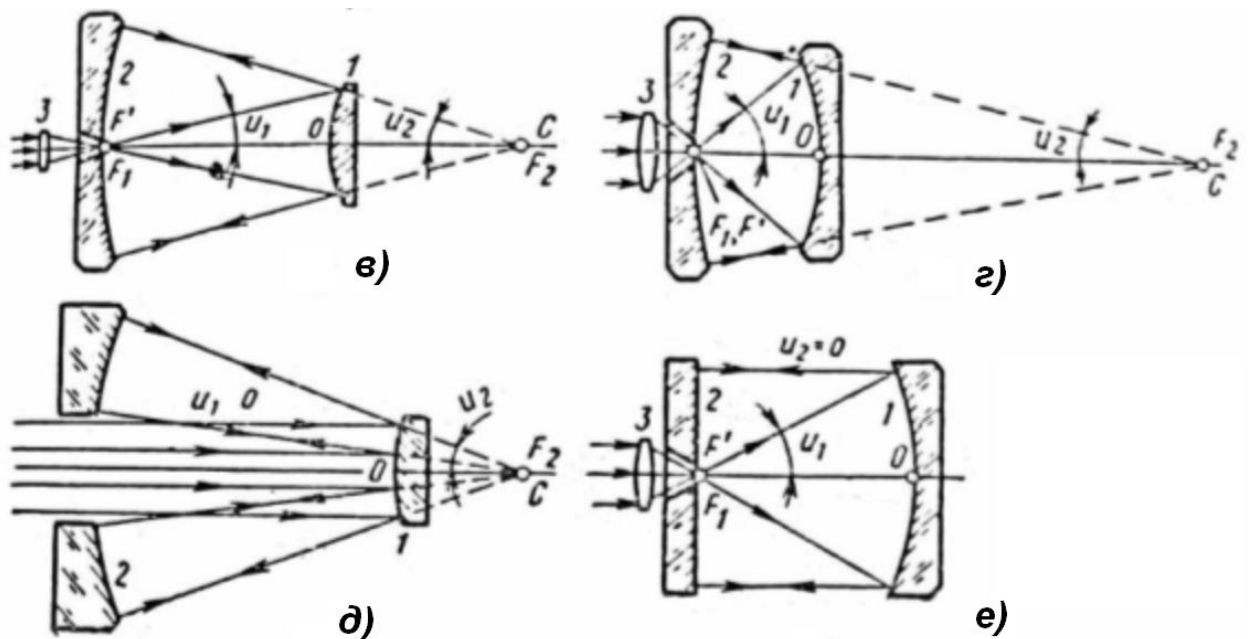


Рис. 9. Автоколлимационные схемы для контроля асферических поверхностей второго порядка:

а, б – гиперболических,
в, г – параболических

Если точечный источник света смещён относительно геометрического фокуса вдоль оси на малую величину Δ_x или перпендикулярно оси на малую величину Δ_y , то отраженные от поверхности второго порядка лучи образуют несферический волновой фронт, величину деформации которого для соответствующих случаев можно определить по формулам

$$N_x = \frac{8\Delta_x \varepsilon \sin^4 \frac{u}{2}}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos u + 1}; \quad (9)$$

$$N_y = \frac{8\Delta_y \varepsilon \sin^3 \frac{u}{2} \cos \frac{u}{2}}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos u + 1}, \quad (10)$$

где N_x и N_y - величины деформаций волновых фронтов соответственно для случаев продольной (смещение вдоль оси) и поперечной (смещение перпендикулярно оси) расфокусировок;

ε - эксцентриситет поверхности второго порядка;

u - апертурный угол в геометрическом фокусе, относительно которого определяется расфокусировка.

Формулы (15) и (16) справедливы для эллиптических и гиперболических поверхностей. Для параболических поверхностей или поверхностей, близких к ним ($\varepsilon \approx 1$), можно воспользоваться формулами

$$N_x = \frac{\Delta_x}{2} u^2; \quad (11)$$

$$N_y = \frac{\Delta_y}{4} u^3; \quad (12)$$

где u - апертурный угол в фокусе параболической поверхности.

Зная параметры контролируемой поверхности и полагая, например, допустимую величину N_x или N_y равной $0,25 \lambda$, по формулам (15)-(18) можно вычислить допустимые величины расфокусировок Δ_x и Δ_y . Трудоемкость центровки автоколлимационных систем определяют главным образом эти величины.

КОНТРОЛЬ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕСКОНТАКТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Полированные поверхности измеряют бесконтактными оптическими способами, среди которых различают методы, основанные на законах геометрической оптики (теневые, автоколлимационные) и методы, использующие волновые свойства света (интерференционные). Необходимы те из них, которые позволяют контролировать асферическую поверхность в отражённых пучках лучей.

Наиболее простым можно считать теневой метод контроля Леона Фуко. Он применяется для качественной оценки формы полированных поверхностей и определения характера и пространственного расположения деформации поверхности.

Благодаря высокой чувствительности и наглядности метод завоевал широкое признание. Например, он может быть непосредственно применён для контроля вогнутых эллиптических поверхностей, что иллюстрируется рис.10, где 1 – источник света, с помощью конденсора 2 освещающий малое отверстие – точечную диафрагму 3, которая через призму 4 и микрообъектив 5 изображается в первый фокус F_1 эллиптической поверхности 6. Отраженные поверхности лучи собираются вблизи точки F_2 – второго фокуса эллипсоида и попадают в глаз наблюдателя 7. Структура отраженного пучка зависит от качества проверяемой поверхности. Если поверхность не имеет отступлений от идеальной формы, то все лучи соберутся во второй фокусе F_2 эллипсоида. При наличии дефектов, один из которых отмечен на рис.10 позицией 9, часть лучей пройдет мимо фокуса. Для оценки качества поверхности вблизи точки помещают тонкий непрозрачный экран 8 с прямолинейным лезвием

(нож Фуко), перемещают его в направлении стрелки и глазом 7 наблюдают за изменением освещенности в зрачке детали 6.

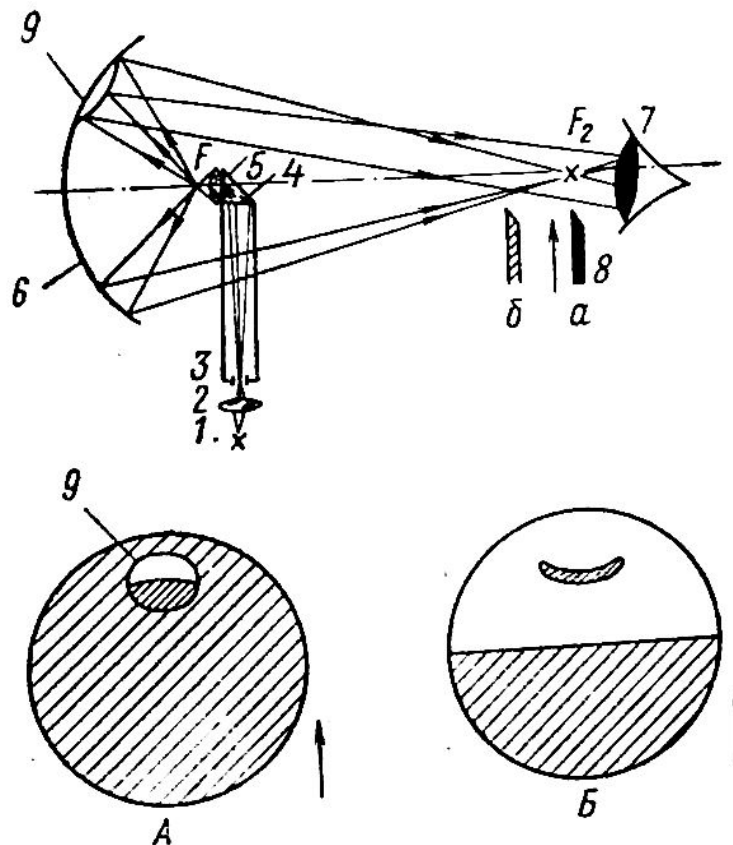


Рис. 10. Теневой метод контроля

При движении ножа наступит момент «прорезания» им части лучей. В этот момент на поверхности возникнет затемнение одного из участков.

По мере передвижения ножа тень будет становиться более отчётливой, а в момент выхода «лезвия» на ось эллипса вся поверхность эллипсоида станет равномерно «гаснуть», оставляя часть дефектной зоны светящейся, а другую часть совершенно темной (рис.10, А). В случае, если «нож» находится не в фокальной плоскости (рис.10, Б) при его перемещении, на поверхности будет двигаться тень в направлении движения ножа, если нож находится перед фокусом, или навстречу движению ножа – если нож расположен за фокусом. Д. Д. Максutow [8] предложил для облегчения расшифровки наблюдаемой картины представить, что исследуемая поверхность плоская и освещается лучами солнца навстречу движению ножа. В этом случае у «бугра» (ошибки) будет освещен скат, обращенный к солнцу, а скат, обращенный к ножу, будет затемнен. При «яме» – наоборот. Этот способ позволяет обнаруживать деформации поверхности до $0,02 - 0,01\lambda$.

Для контроля вогнутого параболоида, дающего параллельный пучок лучей, в схему контроля в параллельный пучок лучей вводят плоское зеркало. Тест-объект типа «светящаяся точка» создает автоколлимационный микроскоп. Схема контроля приведена на рис. 11.

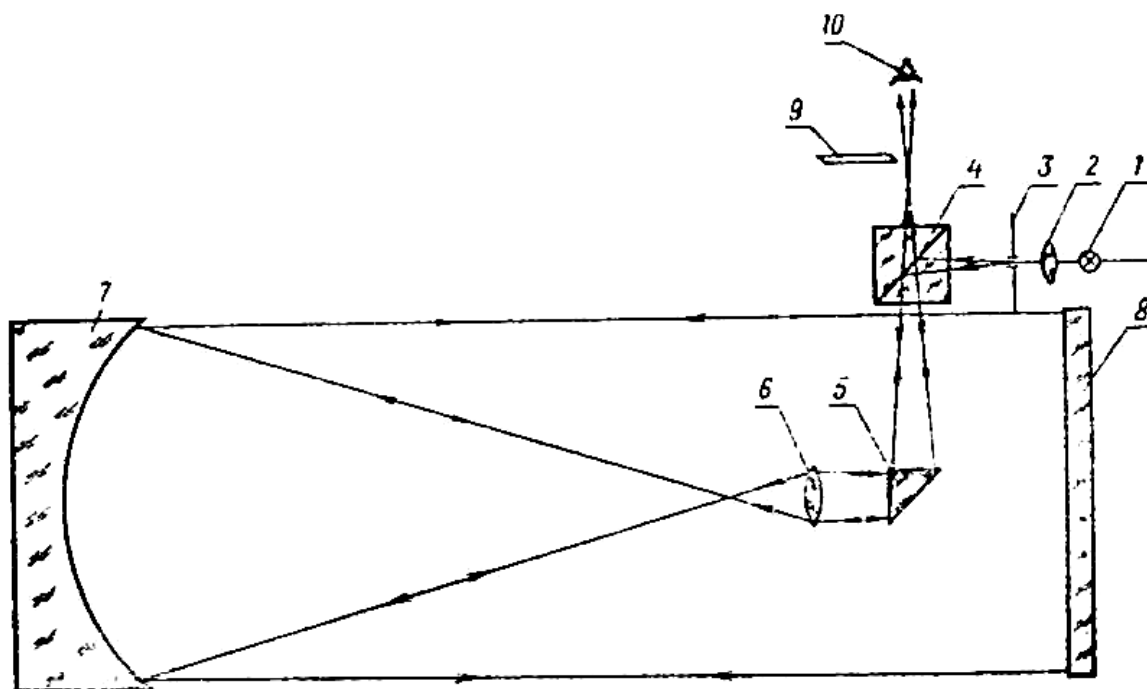


Рис. 11. Схема контроля вогнутого параболоида

1 — источник света, 2 — конденсор, 3 — точечная диафрагма, 4 — светоделительный кубик, 5 — объектив, 6 — мениск, 7 — исследуемое параболическое зеркало, 8 — вспомогательное плоское зеркало, 9 — нож Фуко, 10 — глаз наблюдателя.

В данной схеме лучи дважды отражаются от исследуемой поверхности, поэтому чувствительность метода повышается вдвое. Для контроля выпуклой параболической поверхности Д. Д. Максудов предложил возвращать расходящийся гомоцентрический пучок лучей от выпуклой поверхности с помощью сферического зеркала, центр кривизны которого совпадает с фокальной точкой параболоида. Схема приведена на рис. 12.

Лучи света, вышедшие из объектива 5 и прошедшие мениск 6, параллельным пучком падают на исследуемую поверхность 7, преобразуются ею в гомоцентрический расходящийся пучок, падают на сферическую отражающую поверхность мениска 6, вновь направляются ею на параболоид, в виде параллельного пучка отражаются им в объектив 5, проходя по пути через мениск 6. В фокальной плоскости объектива лучи образуют изображение точки. Теневая картина образуется с помощью ножа Фуко, роль которого выполняет край малого наклонного зеркала 3, имеющего возможность перемещаться в плоскости А—А вместе с диафрагмой 4. Схема испытана при контроле выпуклых и вогнутых параболических поверхностей диаметром до 70 мм. Для компенсации световых потерь проверяемая поверхность покрывалась зеркальным слоем.

Попытки получить количественную оценку состояли в измерении кружка рассеяния в фокальной плоскости объектива или в фокусе поверхности.

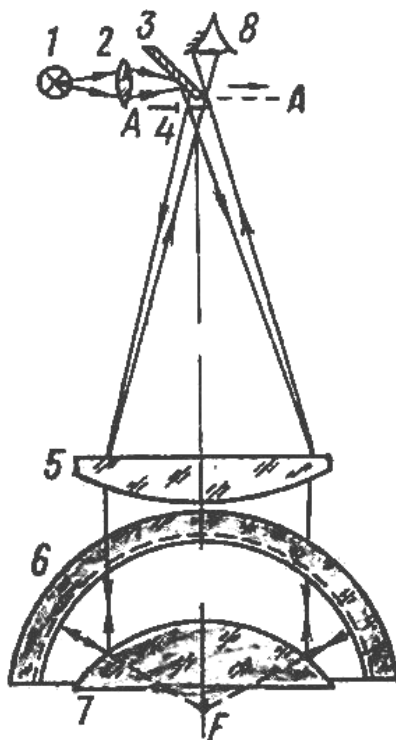


Рис.12. Автоколлимационный теневой прибор
 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – зеркало, 4 – точечная диафрагма, 5 – объектив, 6 – сферическое полупрозрачное зеркало или мениск с концентрическими поверхностями, 7 – исследуемая параболическая поверхность, 8 – глаз наблюдателя.

В традиционных методах оценки качества изображения максимально допустимую величину пятна рассеяния называют наименьшим кружком рассеяния и в чертежах обозначают «НКР». Например: наименьший кружок рассеяния во втором фокусе эллипсоида не более 0,05 мм. Это суммарный критерий качества поверхности. В том случае, когда требуется количественная оценка формы профиля, детализации ошибок поверхности (например, при корректировке технологического процесса) или исследование поверхности с большим апертурным углом, применялся метод, известный под названием «измерение углов отклонения нормалей». Здесь также используется свойство поверхностей вращения второго порядка, состоящее в том, что луч света, направленный на поверхность из одного ее фокуса, после отражения от поверхности проходит через второй ее фокус. Построенный по этой схеме прибор получил название «асферометр». Принцип действия его заключался в том, что в ближайший к вершине фокус измеряемой поверхности при помощи оптической системы проецируется точечный источник света. Его изображение, полученное во втором фокусе, рассматривается с помощью зрительной трубы или микроскопа.

На рис. 13 приведена принципиальная схема контроля выпуклого гиперboloида вращения.

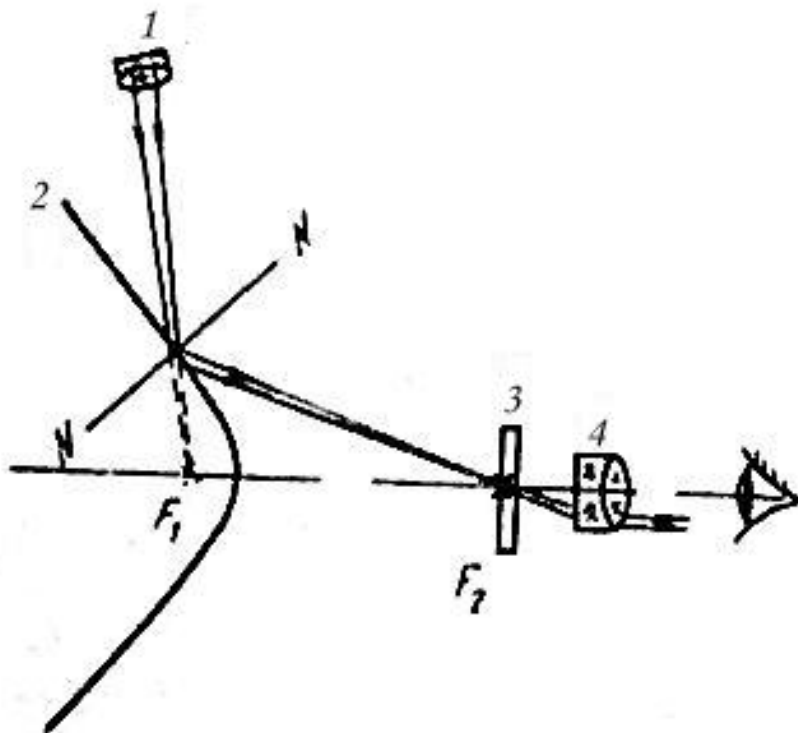


Рис. 13. Схема контроля выпуклого гиперboloида вращения

При повороте оптической проекционной системы 1 вокруг оси, проходящей через фокус контролируемой поверхности 2, пучок лучей последовательно отражается от всех участков ее профиля. Отступления профиля реальной поверхности от идеального приводят к изменению направления отраженных лучей. С помощью шкалы 3 и лупы 4 измеряют угловые отклонения лучей для каждой точки профиля, затем переходят к линейным величинам ошибок поверхности.

КОНТРОЛЬ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Метод пробных сферических стёкол для контроля асферических поверхностей, мало отличающихся от сферы

В настоящее время часто используется изготовление асферических поверхностей (АП), мало отличающихся от сферы или плоскости. Получение таких АП возможно как механической ретушью, так и методом вакуумной асферизации. Для контроля поверхностей с малым отступлением от сферы (порядка нескольких микрон) применяют пробные стёкла или специальные интерферометры.

Если поверхность мало отличается от сферы, то отклонение её от сферы можно рассматривать как «запланированные» погрешности формы. Измеряя эти погрешности путём наложения пробного стекла с ближайшей сферической поверхностью, можно по распределению интерференционных колец определить действительную форму поверхности и сравнить её с теоретической.

Осуществление этого метода возможно лишь в тех случаях, когда ширина интерференционных колец доступна для измерения их диаметра. Здесь расстояние между интерференционными кольцами зависит не от абсолютной величины отступления АП от ближайшей сферы, а от угла воздушного клина, образованного АП и сферой.

Рассмотрим приближенный расчет ширины колец.

Пусть расстояние от точки касания поверхностей до точки с воздушным зазором t равно y (рис.14). Тогда механизм образования интерференционных колец считаем аналогичным образованию интерференционных полос в плоском клине.

С учётом принятых допущений получим:

$$b = \frac{\lambda y}{2t},$$

Где b – ширина интерференционных колец;

λ - длина волны света.

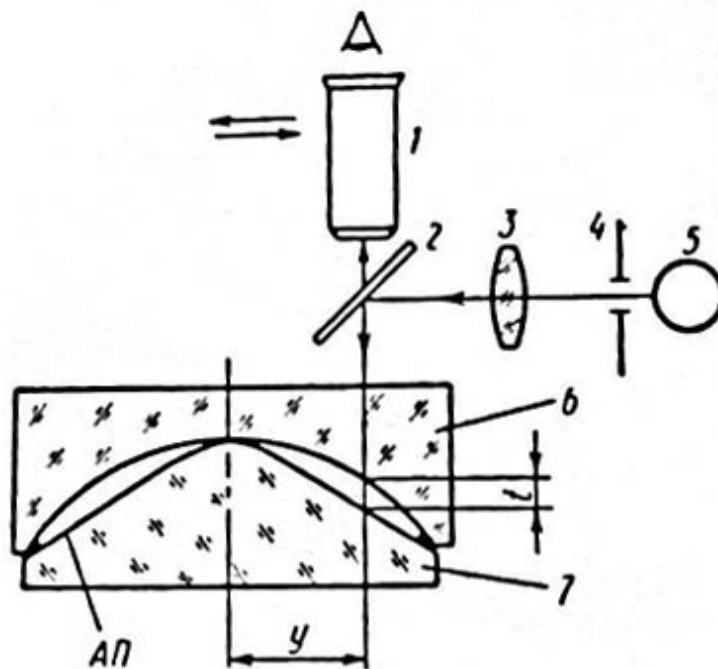


Рис.14. Схема контроля асферических поверхностей методом пробных стекол:

- 1- микроскоп, 2 – светоделитель, 3 – конденсор, 4 – диафрагма,
2- монохроматический источник света, 6 – пробное стекло, 7 - асферическая линза

Таким образом, минимальная ширина кольца $b_{\min}$ зависит от отношения $y/t_{\max}$.

Очевидно, что число m интерференционных колец, наблюдаемых на участке y , можно определить по формуле

$$m \approx \frac{y}{b_{\min}} = \frac{2t_{\max}}{\lambda}.$$

Величины $b_{\min}$ и m определяют целесообразность практического применения метода пробных стёкол. Действительно, если $b_{\min} < 0,01$ мм, то для наблюдения и измерения интерференционных колец необходим микроскоп сильного увеличения, который, как правило, имеет небольшое рабочее расстояние.

Поэтому наблюдение интерференционных колец, локализованных в воздушном зазоре, практически невозможно с помощью обычных микроскопов. На основании практического опыта работы считают, что $b_{\min} \geq (0,05 \div 0,1)$ мм является условием для выполнения надёжного контроля.

Число m интерференционных колец, диаметры которых необходимо измерить, определяет трудоёмкость метода пробных стёкол.

Отмечается, метод пробных стёкол позволяет контролировать только фору АП, но не её местные ошибки. Контроль последних возможен только в тех редких случаях, когда $m \leq (3 \div 4)$ при $b_{\min} \geq 5$ мм, т.е. для АП, очень мало отличающихся от сферы.

Для фиксации пробного стекла в правильном положении между асферической и сферической поверхностями на краю воздушного зазора устанавливают шарики пластилина. Радиус кривизны сферической поверхности пробного стекла рассчитывается с учётом получения минимального воздушного зазора между контролируемой АП и пробным стеклом. Этот расчёт выполняется по элементарным формулам аналитической геометрии и поэтому здесь не рассматривается.

Условия освещения воздушного зазора имеют большое значение при контроле крутых АП, когда необходимо нормальное падение лучей на АП. Однако метод пробных стёкол применим в этом случае, так как измерения интерференционных колец также должны осуществляться в направлении нормалей. Эти условия выполняются при контроле АП на специальных интерферометрах.

При контроле пологих АП лучи, выходящие из линзы должны образовать параллельный либо сходящийся пучок, чтобы отражённые от поверхностей воздушного клина лучи могли попасть в объектив микроскопа. Очевидно, что апертура микроскопа должна быть больше апертуры АП примерно в 2 раза при освещении параллельным пучком лучей. При нормальном падении лучей апертура должна быть равна апертуре АП или несколько превышать её. При контроле АП, мало отличающихся от плоскости, в качестве эталонной поверхности используется плоскость, а воздушный зазор освещается параллельным пучком.

Собственно процесс контроля АП с помощью пробного стекла сводится к определению координат y каждого кольца и величины воздушного зазора t между сферической и асферической поверхностями. Так как при переходе от

данного кольца к соседнему величина t изменяется на $\lambda/2$, то зная номер кольца, можно построить по данным измерения зависимость $t=f(y)$ в виде таблицы или графика и сравнить полученные результаты с теоретическими. Точность контроля зависит главным образом от правильного наложения пробного стекла и качества интерференционной картины. При достаточно контрасте в интерференционных кольцах, расстояние между которыми больше 1 мм, на микроскопе УИМ-21 достигается точность контроля величины t порядка 0,1 мкм, что вполне достаточно во многих случаях.

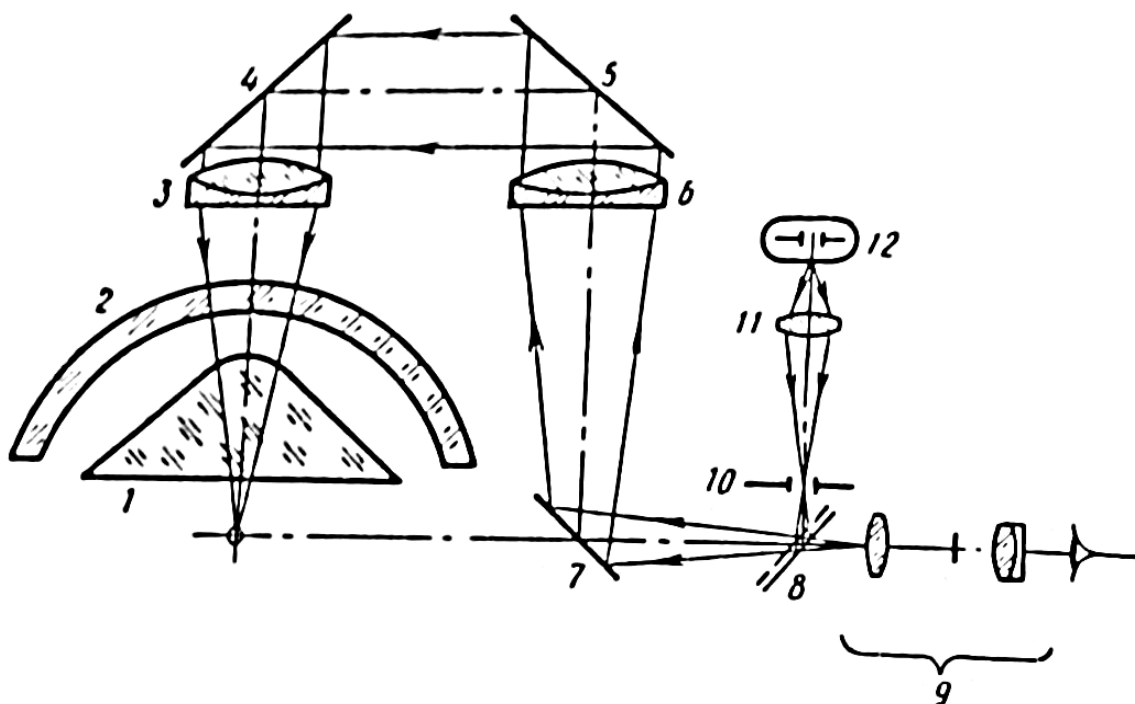


Рис.15. Схема интерферометра для контроля профиля асферических поверхностей

1- исследуемая деталь, 2 - концентрический мениск, 3 и 5 - объективы, 4 и 7 - наклонные зеркала, 8 - светоделитель, 9 - наблюдательная система (теле-лупа), 10 -точечная диафрагма, 11 - конденсор, 12 - источник монохроматического излучения

В тех случаях, когда поверхность мало отличается от сферы, но имеет большую кривизну, условия освещения воздушного зазора оказывают решающее влияние на точность контроля.

Аналогичную принципиальную схему имеет прибор, специально разработанный для данного случая. Прибор снабжён поворотной головкой с простым объективом, исключающим необходимость применения сложных объективов в большой апертурой. Его можно использовать для контроля поверхностей, представляющих собой полусферу и даже более полусферы (для выпуклых поверхностей).

Принципиальная схема интерферометра представлена на рис.15.

С помощью телескопической лупы 9 рассматривается интерференционная картина, возникающая в воздушном зазоре между мениском 2 и деталью 1. внутренняя сферическая поверхность мениска 2 является эталонной. Детали 3 - 7 образуют поворотную проекционную систему, причём задний фокус объектива 3 совмещён с центром кривизны эталонной поверхности мениска 2 и расположен на оси вращения системы. Ход лучей в приборе показан на рисунке.

Интерференционная картина, возникающая из-за разности хода пучков лучей, отраженных от эталонной и контролируемой поверхностей, характеризует изменения толщины воздушного зазора между ними. Если эталонная сферическая поверхность расположена симметрично относительно контролируемой, то интерференционная картина представляет собой систему концентрических колец. Измеряя их диаметры, можно определить радиусы кривизны соответствующих зон поверхности. Для полного контроля необходимо поворачивать проекционную головку, последовательно фиксируя номер интерференционного кольца и угол поворота головки.

Асферическое пробное стекло

Имеется опыт применения асферических пробных стекол [9] для контроля деталей со следующими параметрами проверяемых поверхностей:

максимальный диаметр – 250 мм

максимальная асферичность – 10 мкм/мм

точность асферизации – 40".

Форма поверхности соответствует любому уравнению, но без наличия точек перегиба.

Методика контроля асферическим пробным стеклом аналогична методике контроля сферическим пробным стеклом. Отличие состоит только в том, что при наложении асферического пробного стекла ось его необходимо совместить с осью проверяемой поверхности. При правильном наложении в воздушном промежутке между контролируемой деталью и пробным стеклом возникают концентрические интерференционные кольца.

Оценка ошибки типа астигматизма выполняется так же, как и на сферических поверхностях — по максимальной разности числа интерференционных колец в двух взаимно перпендикулярных диаметральных сечениях.

Зональные ошибки, которые обычно преобладают на асферических поверхностях, определяются числом полос, укладывающихся между двумя соседними зонами. Угловое значение ошибки α может быть вычислено по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{N\lambda}{2\Delta y},$$

где N и Δy — соответственно число полос и расстояние между двумя радиальными зонами.

Контроль качества самих асферических пробных стекол в настоящее время выполняется с помощью пробного стекла. В качестве образцовой поверхности используются сфера или плоскость. Радиус кривизны этой поверхности выбирается из условия, что промежуток между поверхностями при наложении их друг на друга должен быть минимальным. Наблюдение образовавшейся интерференционной картины и измерение положения полос осуществляются на специальных установках. Выбор типа установки зависит от крутизны асферической поверхности. Асферические детали, у которых угол ψ касательной в любой точке поверхности не превышает 4° , целесообразно проверять в прямоугольной

системе координат с использованием серийно выпускаемых универсальных (УИМ-21, УИМ-23) и инструментальных (БМИ, БМИ-1) микроскопов. Схематическое изображение такой установки дано на рис. 16.

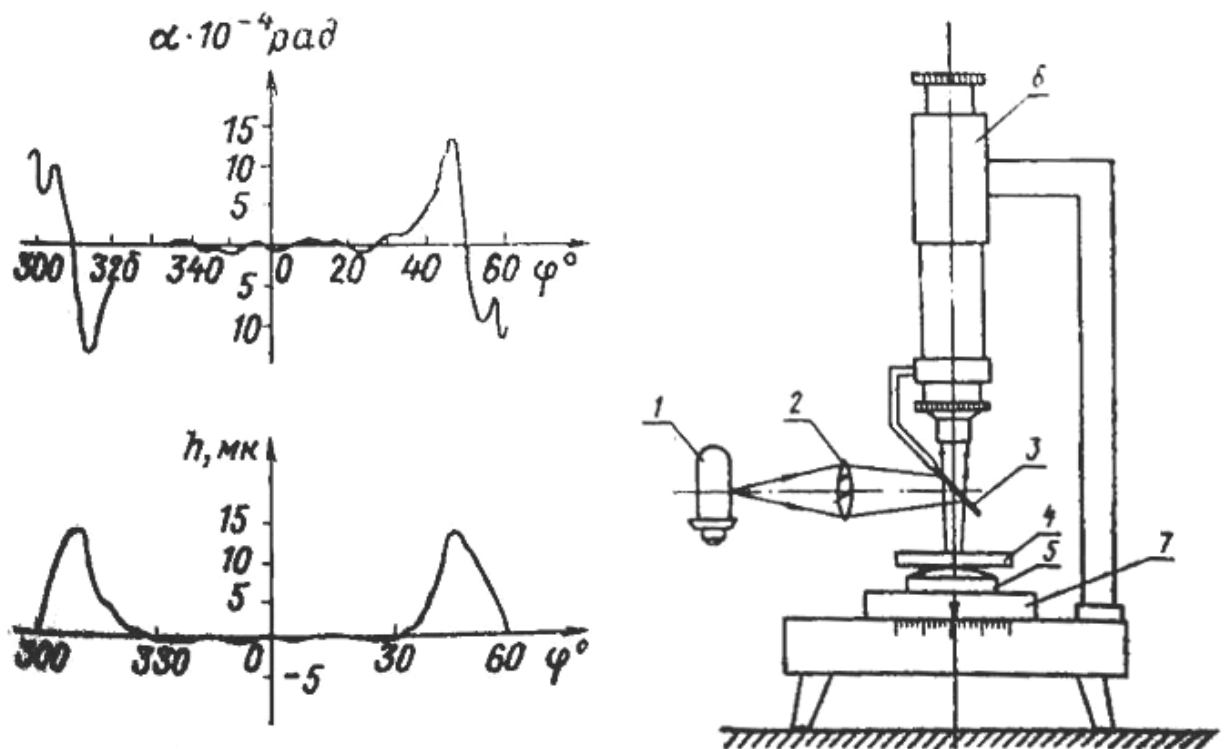


Рис. 16. Контроль качества самих асферических пробных стекол выполняется с помощью пробного стекла

Монохроматический источник света 1 с помощью конденсора 2 и светоделительной пластины 3 освещает воздушный промежуток между образцовой 4 и проверяемой 5 поверхностями. Образовавшаяся в промежутке интерференционная картина наблюдается с помощью визирного микроскопа 6, увеличение которого выбирается в зависимости от минимальной ширины полос. Деталь 5 устанавливается на предметном столе 7 микроскопа так, чтобы одно из ее диаметральных сечений совпадало с измерительным перемещением стола. Измерение сводится к определению номера и координат интерференционных полос в нескольких диаметральных сечениях детали. По результатам измерения выполняется графическое построение измерения толщины зазора.

Если целью контроля является определение местных ошибок поверхности, то начало отсчета может быть связано с любой интерференционной полосой. Практически удобно связывать его с полосой, расположенной в центре детали. При необходимости определения абсолютного значения воздушного промежутка можно поступать следующим образом. Монохроматический источник света заменяется белым. Затем перемещая стол и проводя одновременно наблюдение в микроскоп, отыскивают интерференционную картину в белом свете. На ней определяется положение полосы, по обе стороны от которой наблюдается картина с симметричным распределением спектральных цветов. Указанное положение принимается за начало отсчета полос.

При графическом построении профиля асферической поверхности следует иметь в виду, что с изменением порядка полосы на единицу, толщина изменяется на $\frac{\lambda}{2}$. Знак изменения должен определяться при наблюдении и измерении полос.

Контроль поверхностей путем подсчета числа полос и измерения их координат очень трудоемок и требует от исполнителей большого внимания. Несколько упрощает решение этой задачи применение специальных счетчиков числа полос или компьютеризированного интерферометра с соответствующей программой.

Интерферометр Майкельсона с компенсационным объективом

Интерферометр типа Майкельсона с компенсационным объективом [10, 11] построен на базе интерферометра Тваймана и пригоден для контроля местных ошибок выпуклых и вогнутых поверхностей вращений второго порядка и асферических поверхностей мало от них отличающихся.

Максимальные диаметры проверяемых на приборе поверхностей

выпуклых.....130 мм

вогнутых.....170 мм

Точность контроля.....0,1 мкм

Принцип действия интерферометра заключается в следующем (рис. 17). Монохроматический источник света 1 с помощью конденсора 2 освещает отверстие диафрагмы 3, установленной в фокальной плоскости объектива коллиматора 4. Вышедшие из коллиматора параллельные пучки лучей направляются к светоделительной пластине 5, где каждый из них делится на два – рабочий и референтный. Рабочий проходит сквозь пластину и собирается в фокусе компенсационной линзы 6. Последняя рассчитана так, чтобы ее продольная сферическая аберрация δS_k была равна соответствующей аберрации ($-\delta S'$) нормалей идеальной асферической поверхности 7, установленной вместо проверяемой. Иначе говоря, линза 6 обеспечивает падение всех вышедших из нее лучей по нормалям к поверхности 7. Референтный пучок после отражения от светоделительной пластины направляется к точному плоскому зеркалу 8, отразившись от которого возвращается обратно. На светоделительной пластине он совмещается с рабочим пучком, отразившимся от поверхности 7. Образовавшаяся при наложении пучков интерференционная картина наблюдается глазом, помещенным вблизи фокуса объектива 9, или может быть сфотографирована 10.

Форма полос картины определяет качество проверяемой поверхности. Методика оценки качества практически не отличается от методики оценки пробным стеклом. Основным источником погрешностей прибора является неточность расчета и изготовления компенсационного объектива. Погрешности всех остальных элементов легко выявить и устранить. Для уменьшения величины ошибки надо стремиться к использованию однолинзового компенсационного объектива. Опыт показывает, что такой объектив можно применять для контроля поверхностей с относительным отверстием менее 1:1. Применение совместно с компенсационным объективом коррекционных пластин позволяет повысить

точность и расширить возможности компенсационного метода. Благодаря таким пластинам можно с большой точностью приблизить выходящий из компенсатора асферический фронт волны к теоретической форме проверяемой поверхности. Коррекция достигается за счет нанесения на одну из поверхностей плоскопараллельной пластины или линзы прозрачного слоя переменной толщины (рис. 18). Это осуществляется путем вакуумного напыления.

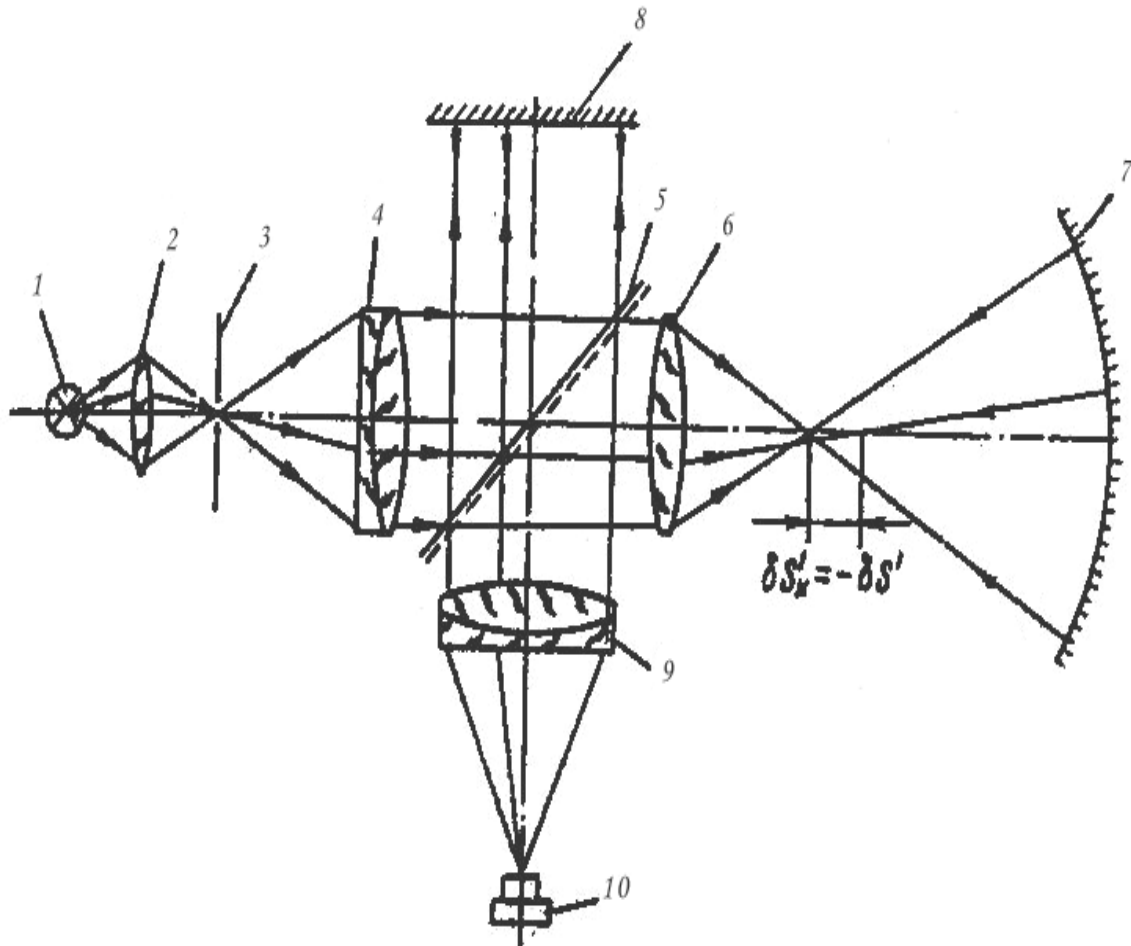


Рис. 17. Интерферометр с компенсационным объективом.

В настоящее время для напыления чаще всего применяется сульфид цинка (ZnS), имеющий показатель преломления $n=2,37$ для $\lambda=589$ нм. Контроль толщины, максимальная величина которой может достигать 30 мкм, выполняется в процессе нанесения слоя. Для окончательной проверки может быть применен способ, аналогичный способу проверки асферических пробных стекол. Применение коррекционных пластин дает возможность использовать компенсационный метод для проверки поверхностей не только второго, но и более высоких порядков.

Интерферометр ИКАП-1

Данный интерферометр [12] является вариантом предыдущего и отличается от него главным образом диаметром действующих пучков и длинами ветвей. Поэтому здесь не приводится описание принципа действия прибора.



Рис.18. Вид коррекционной пластины

Оптическая схема его показана на рис. 18. Те ее элементы, назначение которых аналогично соответствующим элементам предыдущей схемы, обозначены одинаковыми позициями.

Ветвь сравнения здесь располагается параллельно и рядом с рабочей ветвью, благодаря чему влияние на точность контроля температурных градиентов и турбулентных потоков сведено к минимуму.

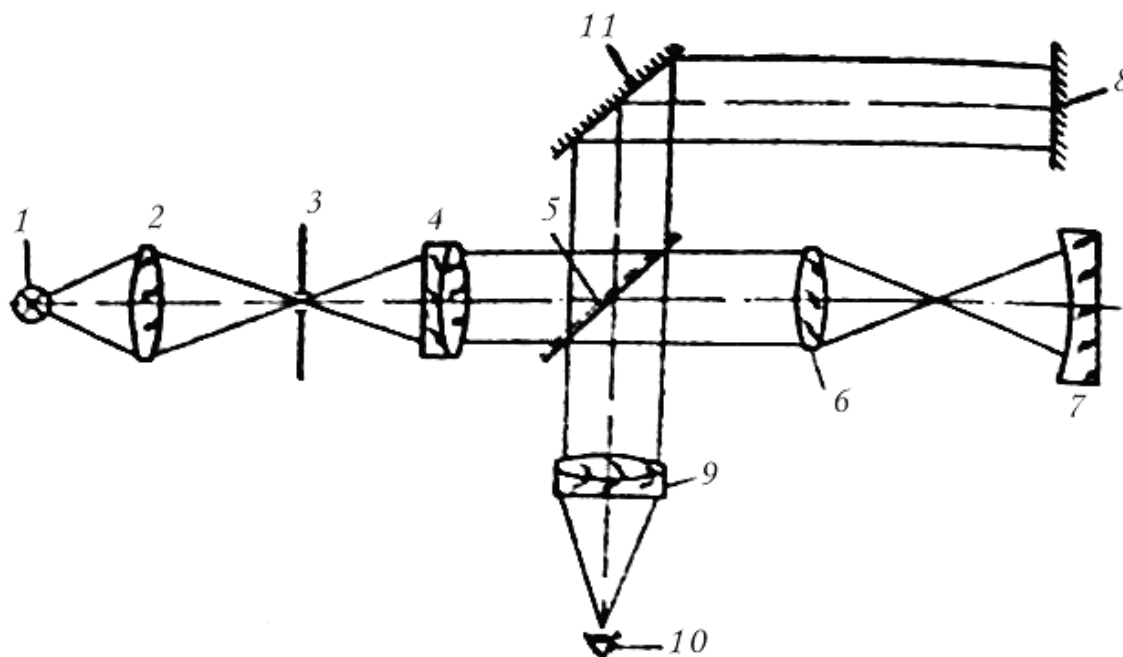


Рис.19. Интерферометр ИКАП-1

Основные технические данные интерферометра

Максимальный диаметр проверяемой поверхности, мм	
вогнутой.....	450
выпуклой.....	150
Длина рабочей ветви интерферометра, мм	4000

Длина, мм	5100
Ширина, мм	900
Высота, мм	900
Масса, кг	670
Пределы перемещения компенсатора вдоль оси, мм	± 30
Пределы поворота проверяемой детали вокруг двух взаимно перпендикулярных осей	$\pm 5^\circ$

Узлы интерферометра смонтированы на прямоугольной сварной станине, установленной на независимом от здания фундаменте. Рабочая ветвь и ветвь сравнения изолированы от внешней среды прозрачным кожухом. Управление элементами прибора дистанционное, осуществляется с помощью миниатюрных электродвигателей. Проверяемая деталь подвешивается на гибкой стальной ленте. Таким путем уменьшаются напряжения, возникающие под действием собственного веса детали. В качестве источника света применяются лампы ДНа С-18 и ДРШ-50. Предусмотрена возможность использования газового лазера.

Прибор можно легко перестроить для работы по схеме Тваймана. С этой целью в рабочую ветвь интерферометра включается имеющийся в комплекте узел со сферическим зеркалом.

Интерферометр ИКП-1

На основе свойств анаберрационных точек был разработан интерферометр ИКП-1 для контроля асферических поверхностей второго порядка [13].

На рис. 20 изображена оптическая схема интерферометра, в рабочей ветви которого установлена автоколлимационная система контроля выпуклой гиперболической поверхности, и показан ход интерферирующих лучей. Волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, должен быть плоским, если поверхность имеет идеальную форму, а центр кривизны S автоколлимационного сферического зеркала 9 и задний фокус F' объектива 7 точно совмещены соответственно с геометрическими фокусами F_1 и F_2 . При этом полупрозрачное сферическое зеркало 5, зеркало 9 и объектив 7 должны иметь высокое качество, так как их собственные погрешности влияют на деформацию волнового фронта, выходящего из рабочей ветви. Эти погрешности могут быть выявлены и в дальнейшем учтены при испытании объектива 7 и зеркала 9 в схеме интерферометра Тваймана, для этого необходимо совместить центр кривизны сферического зеркала с задним фокусом объектива. Такую взаимную проверку ответственных деталей легко осуществить на этом же интерферометре, и она не требует никаких дополнительных приспособлений.

Волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, интерферирует с плоским волновым фронтом, идущим из эталонной ветви. По интерференционной картине определяют погрешности контролируемой поверхности. Для наблюдения и фотографирования интерференционной картины служит телескопическая лупа $2\times$ увеличения, состоящая из элементов 10, 11 и 12. объектив 7, служащий для создания гомоцентрического пучка лучей, хорошо

корректирован на сферическую абберацию и условие синусов для работы в монохроматическом свете для линий D ($\lambda=0,5890$ мкм) и e ($\lambda=0,5461$ мкм).

К интерферометру прилагаются четыре объектива аналогичной конструкции с апертурами $\sin u_1=0,5; 0,4; 0,3; 0,2$, диаметры зрачков входа у всех объективов одинаковы и равны 20 мм.

Так как лучи света дважды отражаются от контролируемой поверхности 8, то последняя должна иметь зеркальное покрытие. В качестве источников света 1 в интерферометре используются лампы типа ДНаС-18 или ДРС-50, установленные перед конденсором 2.

Важной особенностью конструкции интерферометра является вертикальное положение рабочей ветви. Это обеспечивает установку контролируемой детали и автоколлимационного зеркала без зажимных приспособлений и специальных оправ, что гарантирует их от пережатия.

Элементы 8 и 9 (см. рис. 20) устанавливаются соответственно на каретках K_1 и K_2 , расстояние между которыми может меняться в пределах от 90 до 250 мм. Этот предел может быть значительно расширен путём установки указанных деталей на переходные кольца, которые также устанавливаются на каретках.

Для прохождения пучка лучей, идущих из объектива 7, автоколлимационное зеркало должно иметь отверстие в центре, поэтому на асферической поверхности неизбежно наличие центрального неконтролируемого участка. Диаметр этого участка зависит от вида и параметров контролируемой поверхности.

Для вогнутых параболических, эллиптических и гиперболических поверхностей, а также вогнутых гиперболических диаметр неконтролируемого участка в крайнем случае будет равен диаметру отверстия (для вогнутых параболических поверхностей), а в остальных случаях меньше диаметра отверстия.

Для выпуклых параболических и эллиптических поверхностей неконтролируемых участков может достигать большей величины.

Целесообразность применения интерферометра для контроля таких поверхностей должна быть решена в каждом конкретном случае путём расчёта диаметра неконтролируемого участка. Этот расчёт проводится по элементарным формулам, очевидным из геометрических соотношений рис.20 для указанных поверхностей.

Другой важной особенностью конструкции интерферометра является дистанционное управление всеми юстировочными движениями, осуществляемое оператором с пульта управления, что позволяет вести непрерывное наблюдение за интерференционной картиной во время работы.

Интерферометр позволяет в принципе контролировать все виды поверхностей второго порядка, но в основном предназначен для контроля вогнутых эллиптических, гиперболических и параболических, а также выпуклых гиперболических поверхностей.

Диапазон параметров контролируемых поверхностей определяется конструкцией интерферометра.

Диаметр сечения параллельного пучка лучей, выходящих из коллиматорного объектива 4 (см. рис. 20), составляет 20 мм; этот диаметр может быть уменьшен до 5 мм с помощью ирисовой диафрагмы, установленной после объектива. На каретках K_1 и K_2 могут быть размещены оптические элементы, диаметры которых не превышают 210 мм. Расстояние между вершинами контролируемой поверхности и поверхности автоколлимационного зеркала может меняться в пределах $q = 900 \div 250$ мм. В имеющемся наборе объективов максимальное значение $\sin u_1 = 0,5$.

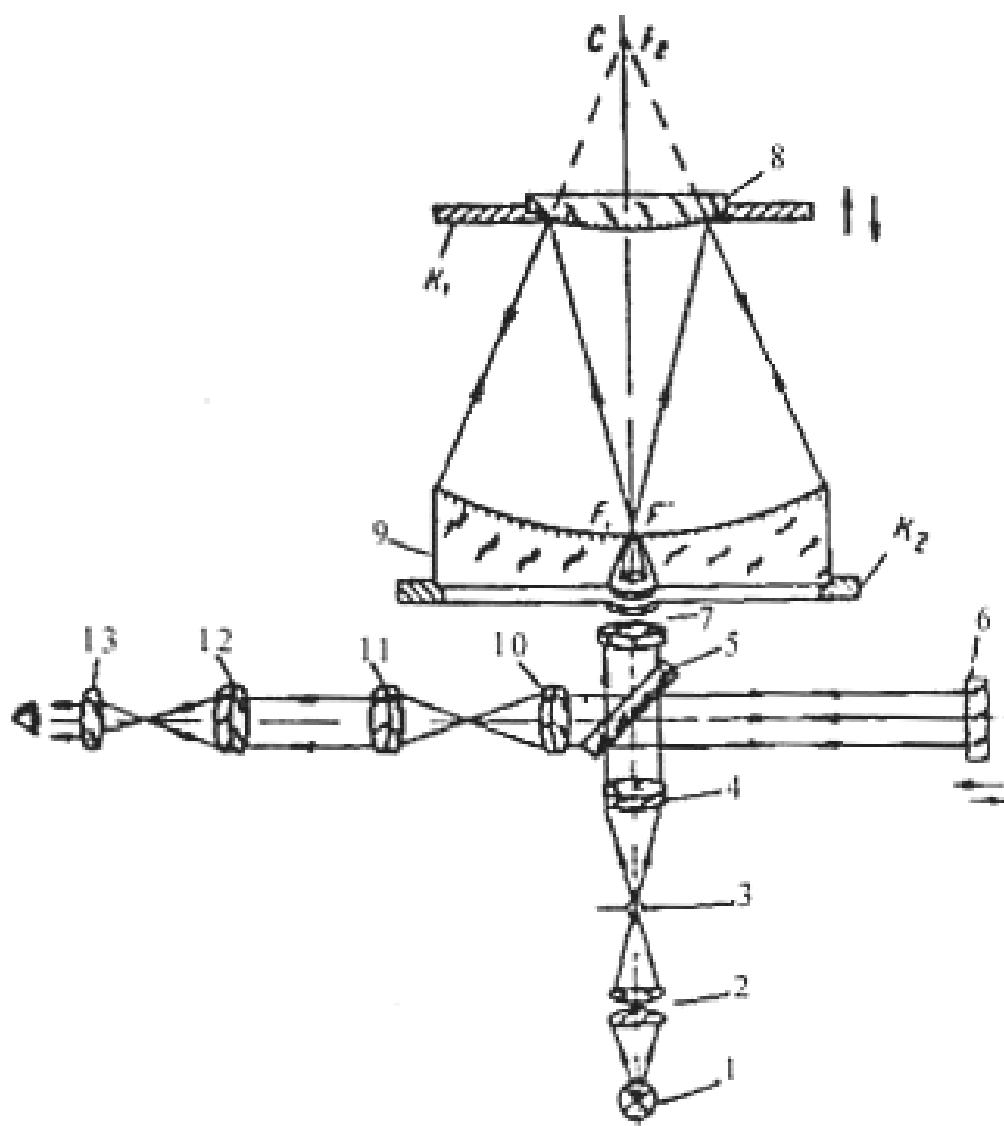


Рис.20. Интерферометр ИКП-1 для контроля асферики второго порядка

Чтобы ответить на вопрос о возможности контроля конкретной асферической поверхности на данном интерферометре, необходимо рассчитать соответствующую автоколлимационную систему, т. е. определить апертурный угол в первом геометрическом фокусе, диаметр и радиус автоколлимационного зеркала и сравнить полученные величины с их допустимыми значениями. Такой расчёт выполняют по формулам, приведённым в таблице 12. Исходными данными в этих расчётах служат параметры контролируемой поверхности:

r_0 - радиус кривизны при вершине АП; ε - эксцентриситет; d – диаметр поверхности.

Меридиональную кривую любой поверхности второго порядка, как известно, можно описать уравнением

$$y^2 = 2r_0x + (\varepsilon^2 - 1)x^2,$$

при этом ось x направлена вдоль оси симметрии кривой. Полагая $y=d/2$ и решая последнее уравнение относительно x , найдём $\Delta = |x|$ - «стрелу прогиба» асферической поверхности, затем, пользуясь формулами табл. 12, можно определить апертурные углы u_1 и u_2 . Диаметр автоколлимационного зеркала вычисляется по формуле

$$D = 2R \sin u_2,$$

где R – радиус автоколлимационного зеркала.

Диаметр неконтролируемого участка находят из выражения

$$C_0 = C \frac{OF_2}{R},$$

где C – диаметр отверстия в центре автоколлимационного зеркала.

Полученные значения D , u_1 , C_0 позволяют решить вопрос о возможности и целесообразности контроля конкретной поверхности на данном интерферометре. Для вогнутой параболической Поверхности $C_0 = C$; для выпуклых параболических и эллиптических поверхностей величина C_0 может иметь решающее значение при выборе метода контроля; в остальных случаях C_0 - пренебрежимо малая величина по сравнению с диаметром контролируемой поверхности.

Для ориентировочного определения диапазона параметров контролируемых поверхностей служат приближенные формулы

$$\operatorname{tg} u_1 \approx \frac{d}{2OF_1}; \quad \operatorname{tg} u_2 \approx \frac{d}{2OF_2}$$

Таким образом, если для данной поверхности величина $\sin u_1 \leq 0,5$, $D \leq 210$ мм и $q = 90 \div 250$ мм, то эта поверхность может быть проконтролирована на интерферометре. Этот приближённый способ даёт достаточно точные результаты, если асферические поверхности неглубокие, т.е. $\Delta \ll OF_2$.

Методика работы на интерферометре может быть условно разделена на два основных этапа: 1) центрировка рабочей ветви интерферометра и 2) определение погрешностей контролируемой поверхности. Опыт работы на интерферометре показал, что наиболее трудоёмким является первый этап. Объясняется это необходимостью установки трёх юстирующих деталей (объектива, контролируемой поверхности и автоколлимационного зеркала) в определённое положение относительно друг друга: задний фокус объектива и центр кривизны автоколлимационного зеркала должны быть соответственно совмещены с геометрическими фокусами контролируемой поверхности.

Процесс центрировки рабочей ветви начинают с установки контролируемой поверхности на расчётные расстояния относительно центра кривизны автоколлимационного зеркала и заднего фокуса объектива. На время центрировки эталонную ветвь интерферометра выключают. В фокусе коллиматорного объектива 4 (см. рис. 21) устанавливают точечную диафрагму диаметром 1мм, изображение которой, полученное от рабочей ветви, рассматривают через наблюдательную трубку с помощью окуляра 13. Пользуясь наклонами и смещениями автоколлимационного зеркала и контролируемой детали, изображение точечной диафрагмы приводят в центр поля зрения, добиваясь одновременно центрированного её изображения. Эту операцию повторяют для точечных диафрагм меньшего диаметра, добиваясь центрированных дифракционных колец в изображении диафрагмы диаметром 0,05мм. Затем включают эталонную ветвь интерферометра. Изображения точечных диафрагм, полученные от обеих ветвей, совмещаются. Включив перемещение эталонного зеркала 6, и одновременно наблюдая (без окуляра 13) поле зрения, уравнивают оптические пути в обеих ветвях, останавливая зеркало 6 в том положении, при котором возникает наиболее контрастная интерференционная картина. Более точную центрировку рабочей ветви выполняют по интерференционным кольцам. Пользуясь фокусирующим движением объектива 7 и автоколлимационного зеркала 9 вдоль вертикальной оси, устанавливают их в такое положение, которое соответствует минимальному искривлению интерференционных полос. После этого можно перейти к определению погрешностей контролируемой поверхности.

Поскольку лучи света дважды отражаются от контролируемой поверхности, то погрешности учетверяются, т.е. ширина одной интерференционной полосы соответствует погрешности поверхности, равной $0,25 \lambda$. Для определения координат погрешностей контролируемой поверхности обратимся к рисунку 21. Луч, идущий на высоте h в объектив, в котором выполняется условие синусов, выходит из него под углом u , при этом

$$\sin u = \frac{h}{f'},$$

где f' - фокусное расстояние объектива.

Из треугольника F_1MT

$$\operatorname{tg} u = \frac{y}{OF_1 + x},$$

где x и y – координаты точки M контролируемой поверхности.

Полученные формулы позволяют определить координату y по измеренной величине h , поскольку уравнение поверхности и фокусное расстояние объектива известны. В практических случаях можно воспользоваться приближённой формулой

$$y \approx OF_1 \frac{h}{f'}$$

Значения OF_1 для соответствующих поверхностей приведены в таблице 12. Величина h определяется по интерференционной картине как половина расстояния между симметричными точками интерференционной полосы.

Для проверки качества изготовления интерферометра последний испытывают сначала в схеме Майкельсона, для чего в рабочей ветви устанавливают эталонное плоское зеркало. В данном приборе полученные интерференционные полосы имели безупречную прямолинейность, что свидетельствует о высоком качестве изготовления раздельного и эталонного зеркал интерферометра.

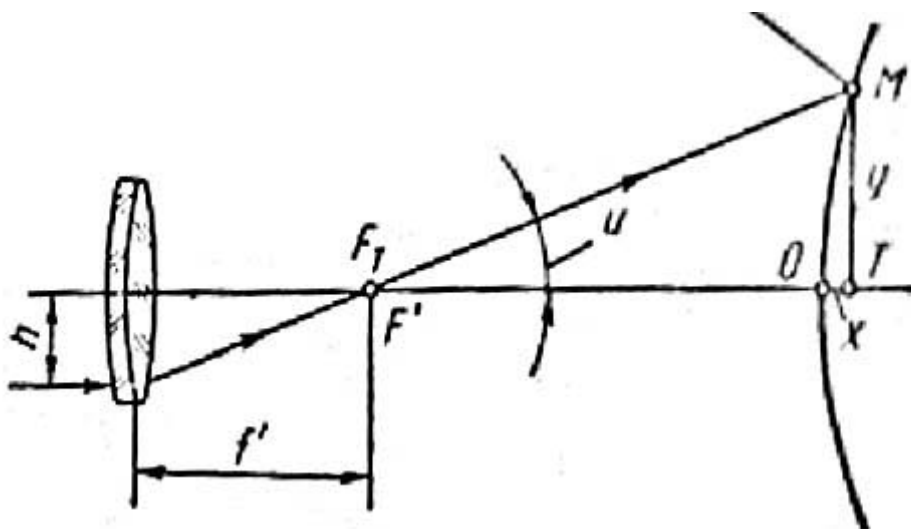


Рис.21. К определению погрешностей сферических поверхностей на интерферометре ИКП-1

После этого были испытаны прилагаемые к интерферометру объективы в схеме интерферометра Тваймана, причём в качестве сферического зеркала использовалось вогнутое автоколлимационное зеркало, изготовленное с высокой точностью. Лучший образец объектива имел волновую aberrацию на краю не более $0,25\lambda$, поэтому оценка погрешностей асферических поверхностей с указанным объективом может быть проведена с точностью, не превышающей собственные погрешности объектива, уменьшенные в 4 раза, т.е. $\lambda/16$.

На рис. 22 приведена фотография интерференционной картины, полученной от выпуклой гиперболической поверхности, меридиональная кривая которой задана уравнением

$$y^2 + 715x - 11,5x^2 = 0.$$

Световой диаметр поверхности равен 62,8 мм. Наибольшее отступление контролируемой поверхности от её теоретического профиля не превышает 1,5 мкм при наилучшей плоскости установки.

Опыт относительно автоколлимационных зеркал

Хотя одно автоколлимационное зеркало может быть использовано для контроля различных видов и параметров асферических поверхностей, все же целесообразнее изготавливать автоколлимационные зеркала в каждом конкретном случае в зависимости от параметров контролируемой поверхности. Таким образом, в самом процессе эксплуатации интерферометра образуется набор зеркал. Изготовление таких зеркал не представляет затруднений при современном уровне оптического производства.

Интерферометр ИКП-1 [15] используется в лабораторных условиях для контроля вогнутых эллиптических, гиперболических и параболических, а также выпуклых гиперболических.

Как видно из приведенных схем, все образцовые детали имеют в центре отверстие, а проверяемые — неконтролируемый участок, диаметр которого зависит от вида и параметров асферической поверхности и легко может быть определен в каждом конкретном случае.

В приборе ИКП-1 управление всеми юстировочными движениями является дистанционным и осуществляется с пульта, расположенного вблизи окуляра. Это позволяет оператору вести непрерывное наблюдение за интерференционной картиной. В комплект интерферометра входят четыре высококачественных объектива с апертурами 0,5; 0,4; 0,3 и 0,2. Диаметры зрачков входа всех объективов одинаковы и равны 20 мм.

Неравноплечий интерферометр

Неравноплечий интерферометр [16] в настоящее время широко используется для визуального и фотографического контроля вогнутых сферических поверхностей больших размеров и радиусов кривизны. Вместе с тем он с успехом может быть применен для проверки некоторых видов асферических поверхностей, систем с асферическими поверхностями, а также поверхностей с небольшим отступлением от сферы. Макетные образцы неравноплечевого интерферометра имеются на нескольких предприятиях оптико-механической промышленности. Имеется также техническая документация на опытный образец, получивший шифр ИТ-172.

Он рассчитан на проверку поверхностей с относительным отверстием до 1:3. В качестве примера использования неравноплечевого интерферометра на рис. 23а показана схема контроля системы Кассегрена, состоящая из параболического зеркала 5, гиперболического вторичного зеркала 6 и плоского зеркала 7. Элементы самого интерферометра на рисунке обозначены позициями 1, 2, 3, 4. Здесь 1 — лазерный источник света (типа ЛГ-56), 2 — микрообъектив, 3 — кубик со светоделительной диагональной гранью, 4 — образцовое сферическое зеркало. Центр кривизны C зеркала 4 постоянно совмещен с фокусом F микрообъектива 2.

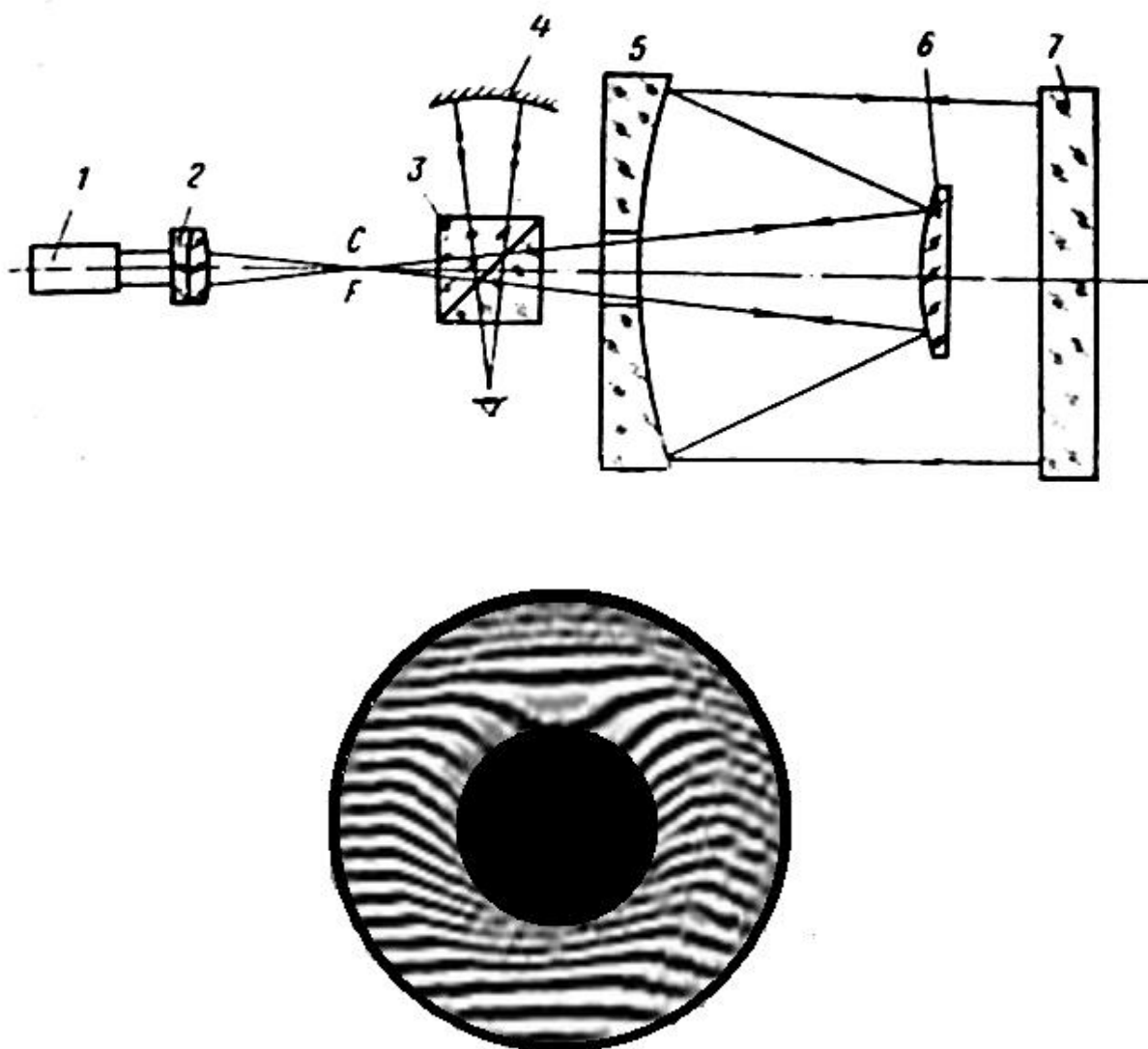


Рис.22. Неравноплечий интерферометр в схеме контроля системы Кассегрена и интерферограмма выпуклой гиперболической поверхности

Для получения интерференционной картины необходимо также фокус исследуемой оптической системы совместить с F . Оценка качества исследуемого волнового фронта выполняется так же, как и при контроле, методом пробного стекла. В принципе на неравноплечем интерферометре можно проверять те же виды поверхностей, что и на приборе ИКП-1. Для этого необходимо расположить элементы рабочей ветви прибора так, как это показано на рис. 49 (а — е). При контроле поверхностей больших размеров и с большими Фокусными расстояниями (радиусами кривизны) следует принимать меры для уменьшения влияния на стабильность интерференционной картины вибраций и воздушных потоков. Оба указанных явления не только затрудняют наблюдение оценки картины, но и снижают точность контроля. Лучшим способом борьбы с вибрациями является размещение на одном хорошо амортизированном основании интерферометра и проверяемой детали. Для снижения влияния воздушных потоков следует измерения производить в малозаселенных помещениях или изолированных участках помещений. Дешевым и простым способом

изоляции является применение натянутого на каркасе полиэтиленового "чулка".

Интерферометры сдвига

Интерферометры сдвига [16] относятся к приборам, пригодным для контроля формы волнового фронта без применения волны сравнения. Входящая в такой интерферометр и подлежащая изучению деформированная волновая поверхность раздваивается, после чего фронты обеих волн сдвигаются друг относительно друга .

Если входящая в интерферометр волна идеальна (плоская или сферическая), то в области переналожения *A* будет наблюдаться равномерная освещенность или возникнут прямые интерференционные полосы. Последние появляются, когда фронты волн образуют между собой малый угол. При отступлении волновой поверхности от идеальной формы в области переналожения двух фронтов волн будет наблюдаться чередование светлых и темных мест, а при наличии угла между фронтами появятся искривленные полосы.

Для разделения и сдвига волновых фронтов используются различные схемы с применением поляризационных элементов, зеркал или решеток.

Рассмотрение элементов теории интерферометра сдвига и методов его компьютеризации дано в Части 6 данного пособия.

Другие схемы интерференционного контроля на традиционных принципах

Контроль вогнутой параболической поверхности 2-го порядка может быть выполнен с использованием схемы, показанной на рис. 23б.

Источник монохроматического света *1* с помощью конденсора *2* освещает через интерференционный светофильтр *3* круглое отверстие в диафрагме *4*, расположенной в фокальной плоскости объектива *5*. Выходящий из объектива *5* параллельный пучок лучей разделяется светоделительной пластиной *6* на два пучка, один из которых направляется в рабочую ветвь интерферометра, содержащую контролируемую поверхность *8*, а другой - в ветвь сравнения с образцовым плоским зеркалом *7*.

Рабочий пучок после отражения от проверяемой поверхности направляется к фокусу, с которым совмещен центр кривизны сферического зеркала *9*. Такое положение зеркала обеспечивает совпадение его нормалей с направлением лучей пучка. После отражения от детали *9* пучок вторично отражается от параболической поверхности и возвращается к светоделительной пластине *6*. Здесь он соединяется и интерферирует с пучком ветви сравнения, отразившимся от зеркала *7*. Пройдя светоделительную пластину, оба пучка направляются в наблюдательную систему, состоящую из объектива *10* и окуляра *11*. Окуляр используется при настройке интерферометра для совмещения интерферирующих пучков. Вынув окуляр и совместив глаз с фокусом объектива *10*, можно наблюдать интерференционную картину, форма полос которой характеризует форму проверяемой поверхности.

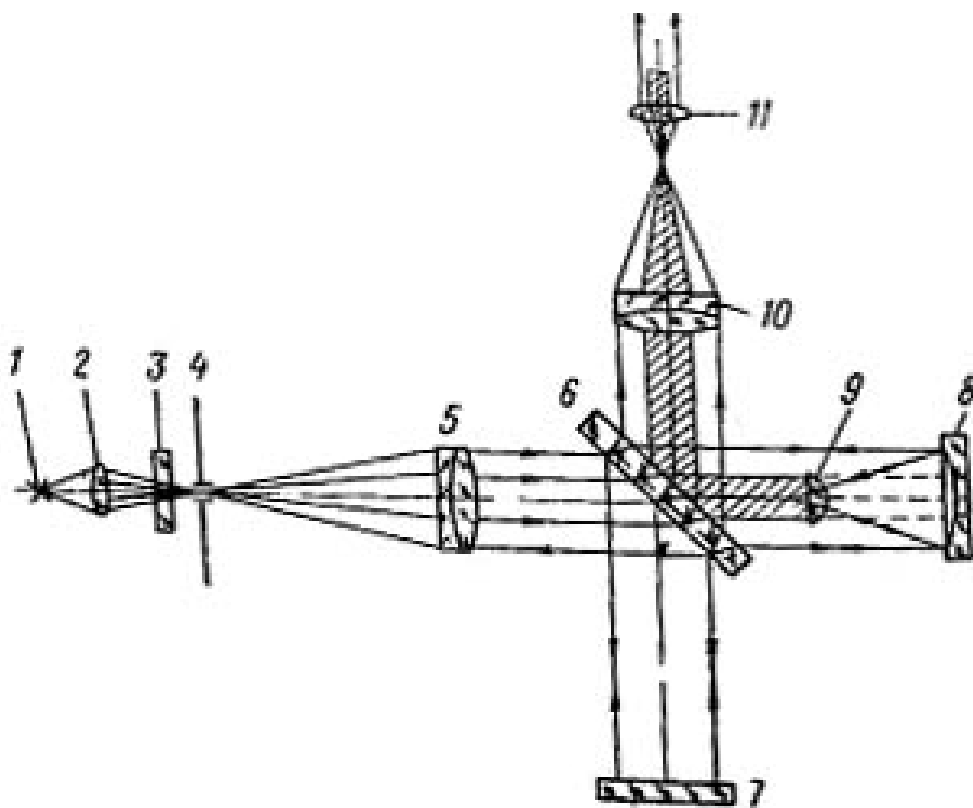


Рис. 23. Контроль вогнутой параболической поверхности 2-го порядка

Как видно из рисунка, рабочий пучок дважды отражается от контролируемой детали, поэтому цена полосы интерференционной картины прибора в два раза меньше цены полосы интерферометра Майкельсона, т. е. близка к $\lambda/4$. Следует отметить, что значение k меняется по полю и может быть вычислено по формуле

$$k = k_0 \frac{\sqrt{16 + \left(\frac{D_i}{f'}\right)^2}}{4},$$

где $k_0 = \frac{\lambda}{2}$

D - диаметр зоны, на которой расположена полоса,
 f' — фокусное расстояние параболы.

В интерферометре центральная часть параболы не контролируется, так как она заменена сферическим зеркалом. Для уменьшения зоны затенения размер зеркала 9 должен быть небольшим. Однако не следует брать его очень малым, так как это затрудняет юстировку прибора, уменьшает контраст картины и увеличивает погрешность контроля. Оптимальным является зеркало с радиусом, близким к 5 мм. Можно использовать, например, высокоточный шарик подшипника качения.

Простая схема для контроля вогнутых эллиптических поверхностей приведена на рис. 24. Осветительная и наблюдательная части, а также ветвь сравнения здесь не показаны. Они аналогичны соответствующим частям

интерферометра рассмотренного выше. В рабочей ветви интерферометра содержится высококачественный микрообъектив 1, формирующий гомоцентрический пучок света. Фокус объектива совмещен с одним из фокусов проверяемой эллиптической поверхности 2.

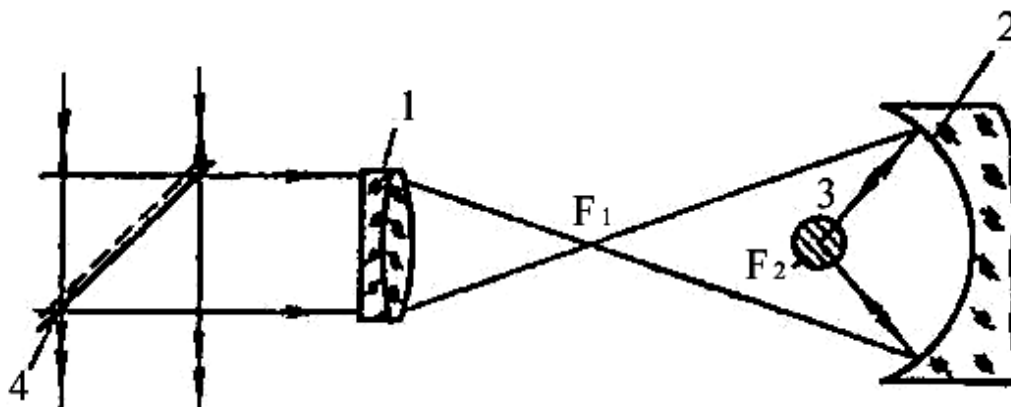


Рис. 24. Схема для контроля вогнутых эллиптических поверхностей

После отражения от указанной поверхности пучок направляется ко второму фокусу, с которым совмещен центр кривизны образцового сферического зеркала 3. Отразившись от зеркала, пучок возвращается обратно и на светоделительной пластине 4 соединяется и интерферирует с пучком сравнения. В остальном действие интерферометра ничем не отличается от действия прибора, описанного выше.

Размещение в рабочей ветви прибора объектива микроскопа накладывает жесткие требования к качеству последнего. В принципе, учитывая то обстоятельство, что объектив работает в монохроматическом свете, можно подобрать из серийно выпускаемых объектив, удовлетворяющий поставленным требованиям.

Компенсационный метод

Сущность метода и виды компенсаций

Необходимость контроля высококачественных изображений, создаваемых оптическими приборами типа микроскопов, зрительных труб, астро- и фотообъективов, привела к развитию разнообразных методов, основанных на законах геометрической и физической оптики. Несмотря на их многообразие, эти методы в сущности сводятся к анализу тем или иным способом волнового фронта, выходящего из оптического прибора. Так как в идеальном и наиболее общем случае волновой фронт должен быть сферическим или плоским, то о качестве исследуемой системы судят по величине и характеру отклонений действительного волнового фронта от идеального. Согласно критерию Рэлея, изображение можно считать идеальным, если отклонение действительного волнового фронта от сферического не превышает четверти длины волны света. Непрерывное совершенствование методов расчёта оптических систем и технологии их изготовления привело к созданию методов контроля, позволяющих с высокой точностью оценить именно малые отклонения

действительного волнового фронта от сферы или плоскости. Величины этих отклонений составляют доли длины волны света, в крайнем случае несколько длин волн.

Трудности контроля АП, обладающих в общем случае большими аберрациями, заставили искать различные пути решения этой задачи. Один из этих путей представляется наиболее простым и естественным: использовать известные методы оценки качества изображения совершенных оптических систем для контроля АП, создавая такие условия. В которых контролируемая АП совместно с простейшими дополнительными элементами образует оптическую систему, близкую к идеальной. Это и положено в основу компенсационного метода, в котором действие АП как источника больших аберраций, вызывающих сильное искажение волнового фронта, компенсируется либо дополнительными оптическими элементами, либо особым положением источника света (предметной точки) относительно АП. Отсюда и название метода – компенсационный.

Рассмотрим два основных вида компенсации: оптическую компенсацию и компенсацию аберраций нормалей АП.

Оптическая компенсация

Простейшим примером оптической компенсации является исправление сферической аберрации в простых линзах с одной АП второго порядка. Гомоцентрический пучок лучей (параллельный или расходящийся), падающий на такую линзу, преобразуется в гомоцентрический пучок лучей (с точностью критерия Рэлея), если относительное отверстие линзы не превышает определённой величины. Роль компенсирующего элемента выполняет сферическая поверхность линзы, специально рассчитанная для этой цели. Однако во многих практических случаях АП входит в состав более сложной оптической системы, например, фотообъектива. При контроле качества изображения такой системы мы одновременно осуществляем косвенный контроль АП, если есть уверенность в качестве изготовления и сборки остальных элементов системы. Типичным примером такой системы служит известный астрообъектив Шмидта, состоящий из двух оптических деталей: плоскопараллельной пластины, одна из поверхностей которой деформирована (АП высшего порядка), и вогнутого сферического зеркала. Деформированная поверхность пластинки компенсирует аберрацию зеркала, поэтому вся система в целом даёт высокое качество изображения. Так как вогнутое сферическое зеркало изготавливают и контролируют с высокой точностью сравнительно простыми и надёжными методами (например, теневым), то оно выполняет роль оптического компенсатора при контроле качества всей системы. Это даёт возможность осуществить косвенный контроль АП сложного профиля, используя принцип оптической компенсации.

Основной недостаток оптической компенсации заключается в необходимости введения во многих случаях сложной дополнительной системы, а потому надёжность контроля значительно снижается. Кроме того, осуществить оптическую компенсацию не всегда возможно.

Компенсация аберраций нормалей АП

Любая АП, в отличие от сферической, имеет совокупность нормалей, пересекающих ось симметрии в разных точках и под разными углами. В общем случае положение нормали АП в любой её точке можно характеризовать углом φ между нормалью и осью и отрезком $\delta s'_n$ между центром кривизны C_0 в вершине поверхности и точкой С пересечения нормали с осью. Отрезок $\delta s'_n$ назван продольной аберрацией нормали по аналогии с продольной сферической аберрацией луча. Очевидно, что любая АП будет полностью определена, если известны зависимость $\delta s' = f(\varphi)$ и радиус кривизны r_0 при вершине поверхности. Такой способ задания формы АП наиболее удобен для расчёта компенсаторов, применяемых для рассматриваемого вида компенсации.

Сущность метода, основанного на компенсации аберраций нормалей АП, заключается в том, что вся совокупность лучей, выходящих из дополнительной оптической системы – компенсатора, полностью совпадает с нормальными к контролируемой АП. Пусть на линзу 1 (рис.26), выполняющую роль компенсатора, падает гомоцентрический пучок лучей (параллельный или расходящийся). Параметры компенсатора рассчитаны таким образом, что любой луч, выходящий из него, падает нормально к АП и после отражения от неё повторяет свой путь в обратном направлении. С точки зрения теории аберрации это означает, что кривая сферической аберрации компенсатора полностью совпадает с кривой аберрации нормалей АП, при этом центр кривизны C_0 при вершине АП совмещён с паракиальным фокусом F'_0 компенсатора. С точки зрения волновой оптики компенсатор преобразует падающий на него плоский или сферический волновой фронт в асферический, совпадающий с теоретической формой контролируемой АП. Волновой фронт, выходящий из компенсатора, служит как бы своеобразным пробным стеклом, налагаемым на контролируемую АП. В дальнейшем можно убедиться, что эта аналогия оказалась удобной для изложения и справедливой по своей физической сути.

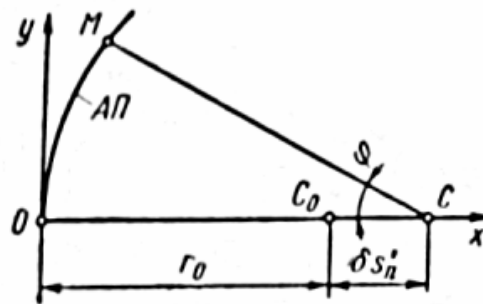


Рис. 25. Аберрации нормалей асферической поверхности

Таким образом, компенсатор и АП в рассматриваемом виде компенсации образовали автоколлимационную телескопическую систему, близкую к идеальной. Очевидно, что компенсатор является наиболее ответственным элементом, который невозможно проконтролировать с высокой точностью известными методами, так как он имеет большие аберрации по сравнению с обычными системами.

В связи с этим конструкция компенсатора должна быть по возможности простой, чтобы контроль отдельных конструктивных параметров его обеспечивал надёжный контроль его компенсатора в целом.

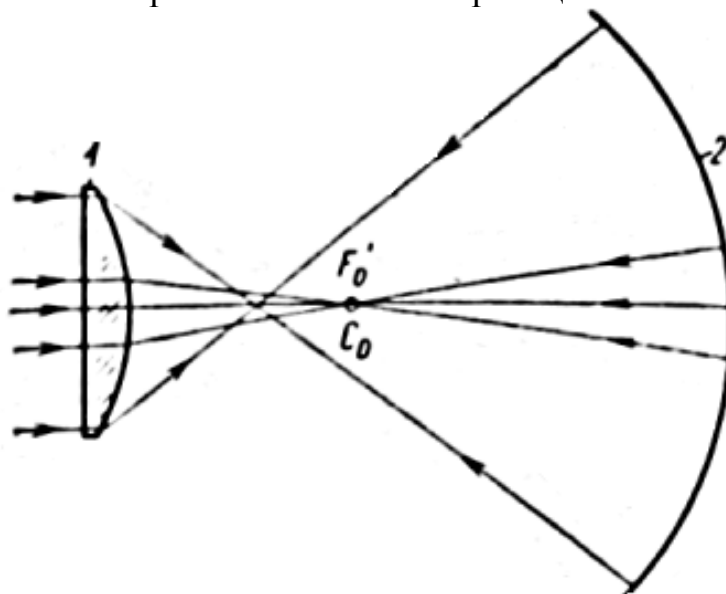


Рис. 26. Компенсация aberrаций нормалей асферической поверхности

В роли компенсатора используют сферические зеркала, плоскопараллельные пластинки, простые одиночные линзы, двухлинзовые или двухкомпонентные системы. Например, если один из компонентов компенсатора хорошо корригирован на сферическую aberrацию, то его можно считать надёжным элементом независимо от сложности конструкции, так как качество такого компонента можно контролировать с высокой точностью известными методами.

Расчёт компенсатора с заданной кривой сферической aberrации не является новой или сложной задачей в вычислительной оптике. Он значительно облегчается тем, что компенсатор работает в монохроматическом свете и aberrации наклонных пучков не имеют значения.

Такова сущность компенсационного метода, основанного на компенсации aberrаций нормалей АП. Этот вид компенсации впервые был предложен и практически применён в 1921 г. академиком В.П.Линником для контроля вогнутого параболического зеркала с помощью теневого устройства и компенсатора, состоящего из двух линз. Д. Д. Максотов предложил компенсационную схему исследования качества вогнутых поверхностей второго порядка с помощью теневого устройства и значительно меньшего по диаметру вогнутого сферического зеркала, выполняющего роль компенсатора. Как известно, теневые методы контроля имеют очень высокую чувствительность, но позволяют оценить погрешности поверхности только с качественной стороны. Применение компенсационного метода в схеме интерферометра, предложенного и впервые осуществленного в нашей стране в 1962 г., позволяет оценить контролируемые АП как качественно, так и количественно. Это обстоятельство особенно важно для технологии изготовления АП. Кроме того, компенсационный метод в настоящее время является единственным, который в

принципе позволяет контролировать АП не только второго, но и высших порядков.

Компенсационный метод контроля на приборе ИКАП-1

Компенсационный метод контроля АП осуществляется на приборе ИКАП-1, рассмотренном ранее. При этом используются основные достоинства интерференционного и компенсационного методов.

Интерферометр позволяет контролировать АП, у которых кривая аберраций нормалей близка или совпадает с кривой сферической аберрации компенсатора. С помощью простейших компенсаторов возможен контроль поверхностей вращения второго порядка, а также поверхностей, мало от них отличающихся.

Типичные кривые сферической аберрации двухлинзовых объективов, которые могут быть использованы в качестве компенсаторов, весьма разнообразны по виду. Применение таких объективов позволяет контролировать не только АП с монотонной меридиональной кривой, но и поверхности, меридиональные кривые которых имеют точку перегиба. Поэтому на интерферометре в принципе можно контролировать любые АП, для которых можно рассчитать и изготовить соответствующие компенсаторы.

Параметры АП, контролируемых на интерферометре, определяются конструкцией рабочей ветви. Наибольший диаметр контролируемой детали не должен превышать 450 мм. Длина рабочей ветви интерферометра составляет 4100 мм, поэтому при использовании положительного компенсатора радиус кривизны при вершине АП и фокусное расстояние компенсатора в сумме не должны превышать 4000 мм (с учётом оправы компенсатора и необходимых юстировочных движений). В случае применения отрицательного компенсатора радиус кривизны при вершине АП не ограничен.

Наибольший диаметр сечения пучка, выходящего из объектива 5 (см. рисунок), составляет 150 мм, поэтому и наибольший диаметр компенсатора не должен превышать 150 мм. При контроле выпуклых АП их диаметр должен быть менее 150 мм, а радиус кривизны при вершине может быть как угодно большим.

КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕХПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ВЫСОКИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Одной из наиболее актуальных проблем современного оптического производства является создание управляемых высокопроизводительных процессов, способных обеспечить выпуск элементов асферической оптики с повышенными точностными и эксплуатационными характеристиками [17]. При этом большой интерес представляют АП (асферические поверхности) не только второго порядка, но и высших порядков.

В настоящее время наиболее перспективным направлением решения задачи получения таких асферических поверхностей является создание комплексных технологических процессов, сочетающих в едином

технологическом цикле элементы нескольких способов формообразования асферической поверхности, представляющие наиболее существенные их достоинства. Задача высокой производительности технологических процессов формообразования асферических поверхностей, безусловно решается за счет автоматизации производства, что в свою очередь требует от технологов разработки управляемых технологических процессов, допускающих возможности коррекции профиля формируемой поверхности на любой стадии изготовления за счет автономного управления независимыми технологическими параметрами формирования асферической поверхности.

Наиболее распространенный и универсальный метод обработки асферической поверхности – абразивная обработка – обладает высокой производительностью и не имеет ограничений по асферичности получаемых асферических поверхностей, но класс формируемых поверхностей ограничен поверхностями второго порядка, средней точности. Повышение точности формообразования ведет к резкому снижению производительности процесса. Это связано с особенностями технологического процесса, при котором АП формируется в результате взаимного износа инструмента и обрабатываемой поверхности, приводящего к недостаточной предсказуемости результата взаимодействия. Принципиальные трудности в выделении независимых параметров процесса ограничивает возможности его автоматизации.

Из процессов получения асферических поверхностей «неизнашиваемым» инструментом наибольший интерес представляет ионная обработка, которая показала свою эффективность как самостоятельный способ формообразования асферических поверхностей высокой точности, но принципиально малой асферичности.

В данной работе представлены результаты исследований по созданию комплексного процесса получения асферических поверхностей с высокими технологическими параметрами:

Крутизна, град: выпуклые – 45, вогнутые – 40

Асферичность, мкм: 1000

Точность профиля, угл.сек: 10-20

В процессе разработки технологического процесса проведены исследования отдельных элементов технологии, отработаны схемы контрольно – измерительного и технологического оборудования, разработана математическая модель технологического процесса обработки асферической поверхности.

Абразивное формирование асферической поверхности осуществлялось «ножевым» инструментом с последующей ретушью малым инструментом. В качестве финишной стадии техпроцесса применялась ионная обработка.

При ионной обработке разработан метод селективной коррекции, предполагающий доводку серии образцов асферических поверхностей с однотипным распределением остаточной ошибки единым управляющим элементом при программировании времени обработки в соответствии с амплитудой обрабатываемой остаточной ошибки.

Кроме того, апробирован метод коррекции остаточных ошибок абразивного формообразования, предполагающего использование нескольких управляемых элементов, единых для всей партии деталей. Этот метод обладает большим числом степеней свободы при коррекции как за счет варьирования радиального распределения остаточной ошибки, так и ее амплитудных значений.

Созданный в результате проведенных исследований комплексный технологический процесс включает в себя следующие основные элементы:

- Расчет технологических параметров асферической поверхности и оптимизации для стадии обработки ножевым инструментом;
- Контроль профиля асферической поверхности в автоколлимационной схеме с математической коррекцией результатов и оптимизации припуска на дальнейшую обработку;
- Расчет параметров обработки «малым» инструментом, обработка и контроль;
- Расчет результатов обработки, выбор схемы ионной обработки, расчет и изготовление управляющих элементов, оптимизация параметров процесса;
- Ионная обработка;
- Окончательный контроль.

На базе рассмотренной технологии возможно создание оптических компонентов для нанотехнологии, лазерной техники, генной инженерии, а также применение технологии в различных оборонных приложениях.

АНАЛИЗ ОБЪЕКТИВА ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНО ДАЛЬНЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

До последнего времени прогресс развития микроэлектроники обеспечивался возможностью непрерывно уменьшать минимальные размеры элементов интегральных микросхем благодаря усовершенствованиям фотолитографических процессов. На сегодняшний день таким способом достигнуто субмикронное разрешение. Дальнейшее развитие требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) диапазон. Становится чрезвычайно актуальным поиск новых технологических решений. В их числе – зеркальные объективы, построенные по схеме Шварцшильда. Показано, что основной задачей, решение которой необходимо для изготовления такого объектива, является создание средств контроля с погрешностью измерения 0.001λ при $\lambda=0.633$ мкм.

Ключевым моментом, обеспечивающим непрерывное развитие микроэлектроники, является возможность непрерывно уменьшать минимальные размеры элементов интегральных микросхем $a_{\min}$. До последнего времени прогресс здесь обеспечивался некоторыми усовершенствованиями фотолитографических процессов, использующих различные области ультрафиолетового диапазона. Тенденции дальнейшего уменьшения предельно

малого размера элементов интегральных схем показывает возможность получения элементов размером от 10-60 нм.

Размер минимального элемента определяется согласно критерию Релея, где величина элемента прямо пропорциональна длине волны света λ :

$$a_{\min} = \frac{k\lambda}{NA}.$$

Здесь k – коэффициент пропорциональности, NA – числовая апертура объектива, λ – рабочая длина волны.

Следует отметить, что выполнение критерия Релея не гарантирует получение высококачественного изображения, если не применяются специальные меры по повышению его качества, например, фазосдвигающие маски или фоторезисты с высоким контрастом передачи изображения.

До недавнего времени в качестве процесса получения нанометровых структур рассматривалась электронолитография остросфокусированным пучком. Ее потенциальные возможности в достижении высокой разрешающей способности хорошо известны; трансмиссионные электронные микроскопы способны формировать изображение в единицы ангстрем. Однако глубокое проникновение высокоэнергетических электронов в светочувствительный материал приводит к размытию изображения из-за вторичных процессов, сопровождающих взаимодействие с веществом. Тем не менее, формирование нанометровых структур здесь вполне достижимо, но на первый план выходит другое обстоятельство. Электронолитография остросфокусированным пучком использует последовательное поточечное, поэлементное или в лучшем случае мелкофрагментарное экспонирование, и это неизбежно увеличивает длительность формирования изображения, что находится в принципиальном разногласии с требованиями к производительности технологических процессов формирования интегральных схем.

Другим примером процесса получения нанометровых структур является использование иммерсии при работе обычного сканер-степпера [17] с ArF эксимерным лазером с длиной волны $\lambda = 193$ нм. На сегодняшний день таким способом получено субмикронное разрешение, характеризуемое $a_{\min} = 45$ нм [1] что по оценкам специалистов дает возможность получить, в конечном счете, разрешение 22-35 нм не меняя существенно конструкцию технологических установок.

Но, в тоже время остается открытым вопрос получения «экстремального» разрешения с размером элементов 5-20 нм. Данное обстоятельство обращает внимание к волновым процессам в экстремально – ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне электромагнитного излучения ($10 < \lambda < 50$ нм). Основанием для этого является появление мощных источников излучения для ЭУФ – литографии и разработка высокоотражающих ($R > 60\%$) многослойных покрытий для ЭУФ оптических систем. Для этого используется многослойное брегговское покрытие на атомарно-гладкой поверхностях. Например, на многослойных брегговских зеркалах, с покрытием на основе Mo-Si, в настоящее время достигнут коэффициент отражения, приближающийся к $R = 70\%$ при $\lambda = 13.4$

нм (теоретическое $R \approx 74\text{--}78\%$). Существуют другие эффективные решения, обеспечивающие $R \geq 60\%$, но все они относятся к диапазону длин волн 10-50 нм с абсолютным теоретическим максимумом в районе 13.4 нм. Поэтому в качестве основной длины волны (рабочей) для формирования наноструктур в ЭУФ – литографии рассматривается длина волны, равная $\lambda = 13.4$ нм.

Оптическая система для ЭУФ – литографии имеет ряд принципиальных особенностей:

В данной оптической системе возможно применение только зеркальных элементов, так как в природе отсутствуют оптически прозрачные материалы для рассматриваемого диапазона электромагнитного излучения.

Углы падения главных лучей на элементы оптической системы не должны превышать 22° , данное обстоятельство продиктовано свойствами покрытия для обеспечения максимального коэффициента отражения.

Необходимо дифракционное качество оптического изображения, ошибки волнового фронта не должны превышать 0.03λ . Дисторсия оптической системы не должна превышать значения $0.1 \times a_{\min}$.

С начала 1990 г. в мире основным инструментом для проведения экспериментальных исследований в ЭУФ - области является объектив, в основе оптической конструкции которого лежит схема Шварцшильда. Такой объектив первоначально применялся в Американском проекте нанолитографии и имел числовую апертуру $NA = 0.06 - 0.09$ [US PAT 5.212.588]. Столь низкое значение апертуры определялось стремлением получить достаточно большое поле изображения, при этом реальное поле изображения представляло собой узкую дугу окружности шириной менее 1 мм. Чтобы проэкспонировать весь топологический слой ИС необходимо сканировать по поверхности полупроводниковой пластины, так что такой объектив относится к классу «степпер - сканер». Такой же принцип формирования топологического слоя лежит и во всех более совершенных объективах. Очевидно, что такая апертура не могла позволить достигнуть требуемого разрешения. Собственно, пороговое разрешение, согласно критерию Релея, составляет в этом случае 90 – 100 нм.

В случае, когда имеется возможность пожертвовать размерами поля изображения, числовую апертуру, согласно инварианту Лагранжа, можно существенно увеличить. Так, например, разработан и изготовлен двухзеркальный объектив с числовой апертурой $NA = 0.3$.

Для достижения более высокого разрешения, в рамках гранта МНТЦ#0991 исследуется схема объектива экспериментального нанолитографа с более высокой числовой апертурой $NA = 0.36$, позволяющей формировать структуры размером ≈ 30 нм.

Описание разработанного нанообъектива по схеме Шварцшильда

Объектив (рис.27) обладает следующими расчетными характеристиками:

Рабочая длина волны – 13.4 нм.,

Числовая апертура – 0.36,

Экранирование – 0.36,
 Размер поля изображения – 0.82 x 0.82 мм,
 Увеличение = -10
 Среднеквадратичное отклонение волнового фронта (СКВ) по полю
 изображения – $0.01\lambda \div 0.12\lambda$
 Глубина фокуса для крайней точки поля изображения = ± 15 нм.
 Глубина фокуса для центральной точки поля изображения - ± 50 нм.

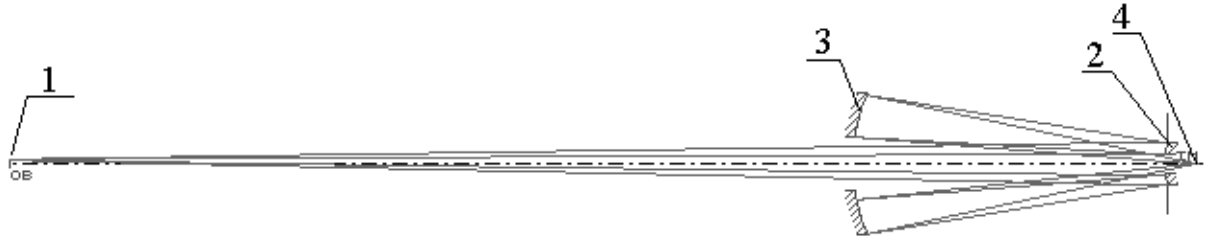


Рис.27. Объектив по схеме Шваршильда

1-маска (объект), 2 - главное (малое) зеркало, 3 – вторичное зеркало, 4 – плоскость резиста (плоскость изображения)

Уравнение, описывающее зеркала оптической системы, имеет следующий вид: $y^2(z) = 2R_0z + (e^2 - 1)z^2 + A_3z^3 + \dots + A_nz^n$, где R_0 - радиус кривизны при вершине, e^2 - квадрат эксцентриситет поверхности, $A_3 \dots A_n$ - коэффициенты разложения.

В таблице 1 показаны некоторые технологические характеристики асферических поверхностей, используемых в объективе.

Таблица 1. Технологические характеристики асферических поверхностей

Характеристика	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Асферичность	0.0145 мм	0.0165 мм

Для реальных оптических систем волновая абберация описывается через ортогональные коэффициенты разложения следующим образом:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n [R_n^m(\rho)(C_{nm} \cos m\varphi + S_{nm} \sin m\varphi)], \quad (13)$$

где C_{nm}, S_{nm} - косинусный и синусный коэффициенты разложения волновой абберации. Если в системе отсутствуют децентрировки, то в этом случае $S_{nm} = 0$, тогда выражение 1 можно записать в следующем виде:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_m C_{nm} R_n^m(\rho) \cos m\varphi. \quad (14)$$

В таблице 2 показаны коэффициенты разложения волновой абберации рассматриваемого объектива на рабочей длине волны $\lambda_p = 13.4$ нм для случая центрированной системы. При вычислении коэффициентов Цернике

центральное экранирование не учитывалось, т.е. аппроксимация аберраций была выполнена по полной апертуре.

Таблица 2. Разложение волновой аберрации объектива по коэффициентам Цернике для $\lambda = 13.4$ нм

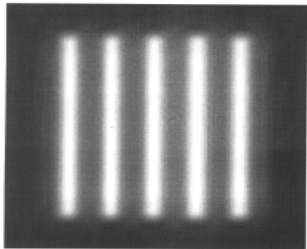
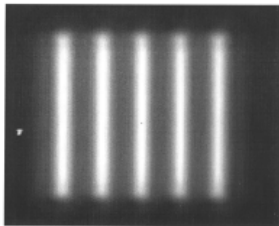
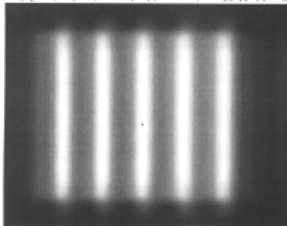
C_{nm}	Координаты на изображении		
	край поля	$\frac{1}{2}$ часть поля	центральная часть поля
20	-0.028	0.013	0.026
40	0.000	0.001	0.001
60	-0.002	0.013	0.001
11	-0.001	0.002	-
31	0.003	0.002	-
51	-0.005	-0.002	-
22	0.285	0.072	-

В таблице 3 показаны результаты моделирования разрешения объективом периодической структуры с шириной полос 30 нм на основе векторной теории дифракции, с учетом экранирования оптической системы для различных точек поля изображения [4].

Как видно из описания волнового фронта, аберрации центральной части поля настолько малы, что не критичны для качества изображения центральной части поля, («размытие» изображения определяется эффектом центрального экранирования), в отличие от периферийной части, где происходит заметное ухудшение качества изображения.

Высокие требования к качеству изображения влекут за собой необходимость изучения технологических свойств объектива, включающего в себя анализ допусков и средств контроля, что, в конечном счете, определяет возможность изготовления системы.

Таблица 3. Результаты моделирования периодической структуры ЭУФ – объективом на рабочей дине волны $\lambda = 13.4$ нм

центральная часть поля	$\frac{1}{2}$ часть поля	край поля
		
Контраст изображения 0.6	Контраст изображения 0.58	Контраст изображения 0.5

Анализ объектива

Этапы анализа объектива, содержащего в себе асферические поверхности, можно сформулировать следующим образом.

- Определение допусков на форму асферической поверхности.
- Определение возможности аттестационного, а в большей степени технологического контроля оптического компонента, содержащего асферическую поверхность.
- Определение характера ошибки асферической поверхности, допустимой для заданного качества оптического компонента, содержащего асферическую поверхность.

Существуют следующие основные типы отклонений (ошибок), возникающих при обработке асферических поверхностей: зональные отклонения с синусоидальным распределением деформации, локальные ошибки, мелкоструктурные («дребезг»), отклонения типа комы (например «сорванный» край).

Волновая aberrация оптического компонента, обусловленная полной ошибкой поверхности, выражается в следующем виде:

$$W_{\Delta скв} = [1/s \iint (W - \bar{W})^2 ds]^{0.5}, \quad (15)$$

где s – площадь светового диаметра, $\bar{W}$ – среднее арифметическое отклонение значения деформации в пределах светового диаметра.

При этом:

$$W_{\Delta скв}^2 \cong W_{a.скв}^2 + W_{м.скв}^2 + W_{з.скв}^2 + W_{к.скв}^2, \quad (16)$$

где $W_{a.скв}^2$, $W_{м.скв}^2$, $W_{з.скв}^2$, $W_{к.скв}^2$ – средние квадраты значений астигматической, местной (локальной), зональной деформации и, соответственно, комы.

Полное качество оптической системы определяется остаточными расчетными и технологическими aberrациями. Суммарные aberrации не должны ухудшать качество оптического изображения всей оптической системы.

Можно записать систему неравенств, характеризующую изменение качества оптической системы, с учетом того, что изготовленная оптическая система в центре поля должна удовлетворять критерию Марешаля, а на краю поля допускается ухудшение качества изображения до $W_{скв} = 0.2\lambda$, что вызывает, согласно векторной теории дифракции, понижение контраста в изображении структуры с размером 30 нм. на ...%.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda}{14} &\leq W_{скв}^0 + W_{\Delta скв}^0 \\ \frac{\lambda}{5} &\leq W_{скв}^1 + W_{\Delta скв}^1 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где $W_{скв}^0$ и $W_{\Delta скв}^0$ – остаточное, согласно расчету, среднеквадратичное отклонение волнового фронта для центра поля и среднеквадратичное отклонение, обусловленное ошибками изготовления системы.

$W_{скв}^1$ и $W_{\Deltaскв}^1$ - остаточное, согласно расчету, среднеквадратичное отклонение волнового фронта для края поля и среднеквадратичное отклонение, обусловленное ошибками изготовления системы для края поля.

С помощью несложных преобразований можно определить значение допустимого среднеквадратичного отклонения волнового фронта, обусловленного технологическими ошибками:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda}{14} &\leq W_{скв}^0 + W_{\Deltaскв}^0 \\ \frac{\lambda}{5} &\leq W_{скв}^1 + W_{\Deltaскв}^1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} 0.06\lambda &\leq W_{\Deltaскв}^0 \\ 0.08\lambda &\leq W_{\Deltaскв}^1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow W_{\Deltaскв} \leq 0.06\lambda. \quad (18)$$

Исходя из выражений (16.....4) и (17.....6) и учитывая, что оптическая система состоит из двух зеркал, а также допуская, что среднеквадратическая деформация волнового фронта, вызванная ошибками изготовления, распределена между зеркалами равномерно, для одного зеркала можно записать:

$$W_{\Deltaскв} \leq 0.03\lambda \Leftrightarrow [W_{а.скв}^2 + W_{м.скв}^2 + W_{з.скв}^2 + W_{к.скв}^2]^{1/2} \leq 0.03\lambda. \quad (19)$$

Из разложения волнового фронта (таблица 2) мы видим, что максимальный вклад в его деформацию вносит астигматизм. Рассмотрим допуск на астигматическую составляющую деформации волнового фронта в предположении, что другие составляющие в выражении (19) отсутствуют.

Средний квадрат деформации волнового фронта имеет вид:

$$W_{скв}^2 = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{C_{n0}^2}{n+1} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^N \frac{1}{n+1} (C_{nm}^2 + S_{nm}^2). \quad (20)$$

При наличии только одной астигматической составляющей средний квадрат деформации волнового фронта можно записать следующим образом:

$$W_{скв}^2 = \frac{C_{22}^2}{6}. \quad (21)$$

Допустимое значение местного астигматического отклонения ΔN определяется соотношением [5]:

$$\Delta N_A = \frac{2C_{22}}{\lambda_k}, \quad (22)$$

где λ_k - контрольная длина волны.

Тогда, с учетом (19), (20) и (21), можно записать:

$$\Delta N_A = \frac{2\sqrt{6W_{скв}^2}}{\lambda_k}; \quad \Delta N_A = \frac{0.15\lambda}{\lambda_k}. \quad (23)$$

В таблице 4 показано допустимое значение ΔN_a на вогнутое зеркало в зависимости от контрольной длины волны; видно, что допуск на N_a изменяется пропорционально отношению λ_p/λ_k .

Таблица 4. Допустимое значение ΔN_A в зависимости от контрольной длины волны

Ошибка поверхности	Контрольная длина волны λ , мкм					
	0.633	0.55	0.365	0.248	0.193	0.0134
ΔN_A	0.003	0.004	0.005	0.008	0.01	0.15

В то же время существуют технологические требования, заключающиеся в том, что ΔN исходной поверхности (ближайшая сфера) определяется требованиями к ΔN изготавливаемой асферической поверхности и должна быть в 2-3 раза меньше [6]. Так как технологический контроль на рабочей длине волны невозможен вследствие недостатка света (отражение от исследуемой поверхности, не имеющей отражающего покрытия, в этом случае, минимально), то данное обстоятельство приводит к необходимости использования при контроле излучения видимого диапазона (например, с $\lambda_k = 632.8$ нм). В этом случае возникает вопрос о выборе или создании такого средства контроля, погрешности которого не превышают $0.001\lambda_k$. Таким образом, выбор контрольной длины волны приобретает принципиальное значение для создания рассматриваемого объектива.

Что касается общего отклонения профиля (N), то для асферических поверхностей эта ошибка характеризуется отклонением ΔR_0 при вершине поверхности и отклонением коэффициентов уравнения, связанных с ошибками изготовления.

Как правило, сложные асферические элементы изготавливаются в компенсационной схеме контроля и одним из важных моментов является факт существования принципиальной возможности ошибочного контроля асферической поверхности, когда эквидистантная асферическая поверхность будет принята за поверхность, не отличающуюся от расчетной. Эквидистантные поверхности имеют совершенно одинаковые аберрации нормалей, но отличаются друг от друга радиусом кривизны при вершине ΔR_0 . Формирование эквидистантной поверхности зависит от положения контролируемого оптического элемента, содержащего асферическую поверхность, в схеме контроля. Поэтому, рассмотрев допустимые отклонения ΔR_0 , можно тем самым, в первом приближении, указать требования к точности и чувствительности схемы контроля, в том числе - и к установке исследуемого зеркала относительно компенсатора (корректора) аберраций.

Наиболее целесообразной стратегией изготовления рассматриваемого объектива является изготовление вогнутого зеркала в компенсационной схеме контроля. Второе, выпуклое зеркало, изготавливается в паре с первым, вогнутым зеркалом, в схеме объектива. В этом случае интервал изменения ΔR_0 намного шире, так как существует возможность компенсации ошибок как общего профиля, так и местных, непосредственно в процессе изготовления объектива для достижения расчетных характеристик.

На рис.28 показана зависимость $W_{скв}$ объектива от изменения ΔR_0 вогнутого зеркала при компенсации приращения уравнением выпуклого зеркала для центральной и периферийной точки поля изображения. В качестве параметров оптимизации выступают все коэффициенты уравнения. Из графика видно, что допустимое значение приращения, исходя из условия (18.....6), равно 0.3 мм. Изменение стрелки прогиба вогнутого зеркала в этом случае составит 4 мкм, и точность установки исследуемого зеркала должна быть ± 2 мкм.

Контроль общего отклонения профиля поверхности с такой точностью осуществляется методами механического или оптического сканирования. В работе [7] показано, что метод механического сканирования является оптимальным для контроля профиля и приведена схема установки компании «Sira», позволяющая методом механического сканирования определять профиль поверхности с диаметром до 300 мм и асферичностью до 1 мм с точностью 1-2 мкм. Основными преимуществами такого метода является возможность контроля выпуклых и вогнутых поверхностей с большой крутизной; измерения проводятся бесконтактным способом и при контроле профиля не требуются эталонные оптические детали.

Точность изготовления асферической поверхности связана с выбранной технологией обработки и системой контроля, обеспечивающей возможность выявления ошибок детали, с последующим однозначным их описанием в любой момент времени, для оперативной коррекции технологического процесса.

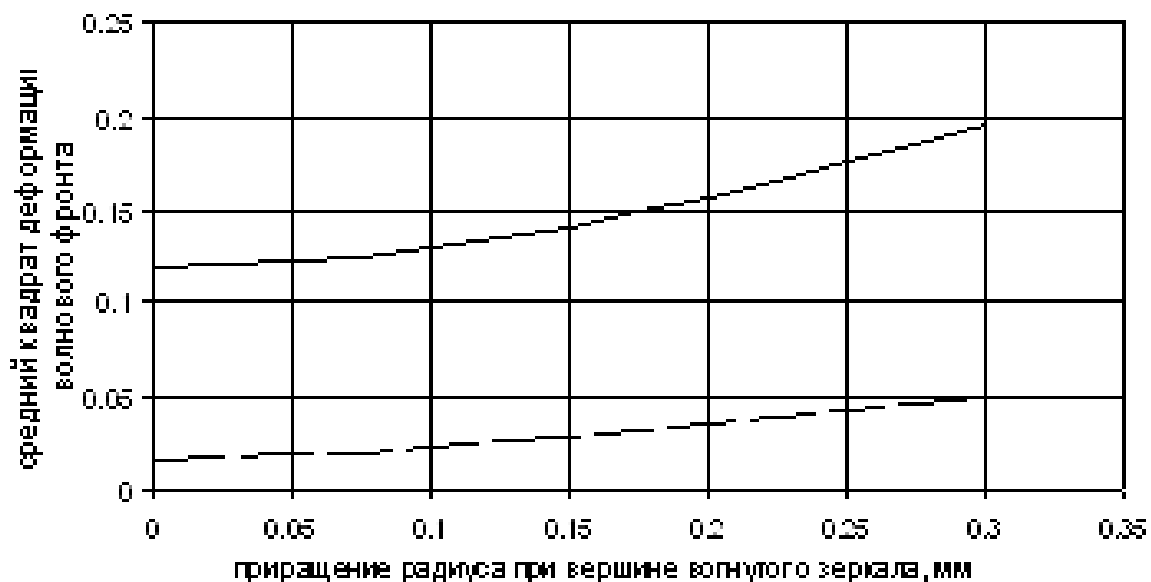


Рис.28. Изменение среднего квадрата деформации волнового фронта в зависимости от приращения радиуса при вершине вогнутого зеркала

Сплошной линией показано изменение периферийной части поля. Штриховой линией - изменение центральной части поля

Основной недостаток компенсационной схемы контроля состоит в наличии некоторой неоднозначности в процессе контроля поверхности в

момент установки компенсатора в схему контроля, когда суммарная ошибка оптической системы «компенсатор + исследуемая деталь» очень большая, и невозможно оценить ошибки поверхности никаким способом, кроме как теневым, который является только качественным.

В этом случае процесс изготовления детали и сопровождающие его методы контроля можно представить следующим образом:

- Начальный этап - асферизация; метод контроля – интерференционный, в схеме контроля сферы.
- Основной этап асферизации; метод контроля – теневой, в компенсационной схеме.
- Финишная доводка поверхности; метод контроля – интерференционный, в компенсационной схеме.

Возможность интерференционного контроля фактически определяется сферической аберрацией, возникающей в результате асферизации поверхности. Методами математического моделирования интерферограмм можно определить допустимое значение асферизации поверхности на начальном этапе. Понятно, что между этапами 1 и 3 происходит разрыв в математическом описании поверхности и, соответственно, обработка поверхности ведется по техпроцессу, определенному на первом этапе, что, безусловно, вносит свои ошибки, которые не всегда можно исправить на этапе финишной доводки поверхности.

В таблице 5 показаны смоделированные интерференционные картины соответствующие разной асферичности. Видно, что корректная расшифровка может идти до асферизации в 1 мкм. Тогда, для обеспечения непрерывного технологического контроля, необходимо рассчитать и изготовить такой компенсатор, свойства которого позволяют компенсировать сферическую аберрацию зеркала на всех этапах обработки. Указанное свойство можно реализовать с помощью панкратики или с помощью принципов, на которых рассчитан «универсальный компенсатор» Д.Т. Пуряева .

Неизбежные погрешности изготовления и установки компенсатора приводят к дополнительной деформации волнового фронта, которая непосредственно переходит на поверхность в результате обработки. Погрешности компенсатора для рассматриваемого элемента объектива экспериментального нанолитографа должны быть много меньше, чем погрешности изготавливаемого зеркала. Поэтому для реализации компенсационной схемы необходимо изготовить и аттестовать компенсатор с точностью меньшей или равной указанной в таблице 4, что снова приводит к проблеме выбора средств контроля.

В заключение необходимо отметить, что помимо указанных трудностей с контролем оптических компонентов существуют проблемы, связанные с юстировкой, с обеспечением точности подвижек зеркал объектива, так как требования к децентрировке и развороту компонентов составляют доли угловых секунд и доли микрометров соответственно .Итак, рассмотрен объектив экспериментального нанолитографа, особенности требований к средствам контроля и к точности изготовления компонентов. Показано, что основной

задачей, решение которой необходимо найти для успешного изготовления объектива, является создание средства контроля, имеющего погрешность меньше $0.001\lambda_k$.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

В последнее время как в России, так и за рубежом проявляется исключительно высокий интерес к фотолитографии, в частности к технологии, которая получила название EUV (Extreme Ultra Violet). Длина волны EUV-излучения около 13 нм, то есть примерно в 25 раз меньше, чем излучение светового диапазона. Требования к оптическим системам для данной области спектра следующие :

- система реализуется с помощью зеркал;
- в системе отсутствует центральное экранирование;
- средний квадрат деформации волнового фронта - $\Delta W_{скв} \leq 0,04\lambda$.

Исходя из требований технологий формообразования и финишной доводки формы оптической поверхности зеркал нанообъектива, ионная асферизация поверхности выполняется на базе предварительно изготовленной (по технологии притира) базовой сферической поверхности. Такая методика накладывает определенные требования как к расчетным параметрам элементов объектива, так и к построению схем и методов контроля.

Необходимо подчеркнуть, что возможность изготовления нанообъектива с заданным разрешением в соответствии с требованиями расчета напрямую связана с адекватными возможностями, созданными аппаратурой и средствами контроля.

Согласно техническому заданию на объектив, среднеквадратическая деформация волнового фронта не должна превышать $\Delta W_{скв} \leq 0,04\lambda$. Отсюда порядок величины максимально допустимой деформации волнового фронта составляет $\Delta W_{max} = 0,16\lambda$. Так как схема 4-х зеркальная, то деформацию волнового фронта, вносимую одним из зеркал, определим как $\Delta W_{зер} = 0,04\lambda$. Имея в виду, что деформация при отражении от зеркала равна удвоенной ошибке зеркала, максимальной допустимой ошибкой зеркала будем считать $\Delta N = 0,02\lambda$.

При $\lambda = 0,013$ мкм получаем $\Delta N \approx 0,02 * 0,013 = 0.0002$ мкм.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Так как хроматизм в данной системе отсутствует, то контроль можно осуществлять в световом диапазоне. Требуемая точность лазерного интерферометра для контроля поверхности зеркала в долях длины волны, при рабочей $\lambda = 0,450$ мкм. (Cd – Ar лазер) по крайней мере $\Delta W_{LS} = 0.0001\lambda$.

Указанная точность интерферометрии может быть достигнута, например, применением фазового метода расшивки.

Однако, традиционные интерферометры для контроля ошибок формы оптических поверхностей обычно содержат образцовую деталь, необходимую для формирования опорного волнового фронта. При этом по умолчанию предполагается, что ее погрешностями можно пренебречь по сравнению с погрешностями контролируемого элемента.

В то же время, применяемые методы обработки интерферограмм, построенные на принципе вычитания образцового волнового фронта из результирующего, не позволяют получить погрешности интерферометра на уровне менее чем $\lambda/20 - \lambda/30$, так как помимо очевидных источников ошибок – нестабильности источника излучения, механических смещений, турбулентности воздуха, существуют ошибки образцовой поверхности. Традиционными методами она не может быть изготовлена точнее чем $\lambda/20 - \lambda/30$.

Кроме того, образцовая поверхность обычно аттестуется в процессе изготовления интерферометра, а в ходе выполнения сеанса измерения указанная образцовая поверхность может претерпевать неконтролируемые деформации, вызванные, например, действием термических, динамических и гравитационных факторов и соизмеримые с ее точностью.

Дифракционный интерферометр

В качестве альтернативы предлагается для контроля объектива и его элементов использовать дифракционный лазерный интерферометр [18, 19]. В данном интерферометре отсутствуют ошибки, связанные с деформацией опорного волнового фронта образцовой оптической поверхностью, так как отсутствует сама образцовая поверхность. Опорный волновой фронт здесь формируется путем дифракции лазерного пучка, сфокусированного на точечном отверстии, диаметр которого соизмерим с длиной волны излучения.

Известные достоинства таких схемных решений (Твайман, Физо) послужили основой их широкого применения. Однако в последние десятилетия повысился спрос на оптические системы и элементы наивысшего класса точности. К таким изделиям можно отнести оптические системы космических телескопов, современных исследовательских микроскопов, технологической аппаратуры микроэлектроники и оптико - электронных устройств записи информации. Требования к точности расчета и выполнения этих систем находятся на уровне $1/20 - 1/30 \lambda$; где λ - длина волны оптического излучения. Таким образом, для контроля при их изготовлении и применении необходимы приборы, обеспечивающие точность на уровне $1/100 - 1/200\lambda$, то есть на порядок точнее традиционных.

Как показано, недостатком классических интерферометров при контроле оптики такого класса является необходимость присутствия в их схемах образцового оптического элемента, точность изготовления которого ограничена значением $\lambda/20$. В качестве альтернативы предлагается для контроля объектива и его элементов использовать дифракционный лазерный интерферометр [19]. В данном интерферометре отсутствуют ошибки, связанные с деформацией

опорного волнового фронта образцовой оптической поверхностью, так как отсутствует сама образцовая поверхность. Опорный волновой фронт здесь формируется путем дифракции лазерного пучка, сфокусированного на точечном отверстии, диаметр которого соизмерим с длиной волны излучения.

Известные достоинства таких схемных решений (Твайман, Физо) послужили основой их широкого применения. Однако в последние десятилетия повысился спрос на оптические системы и элементы наивысшего класса точности.

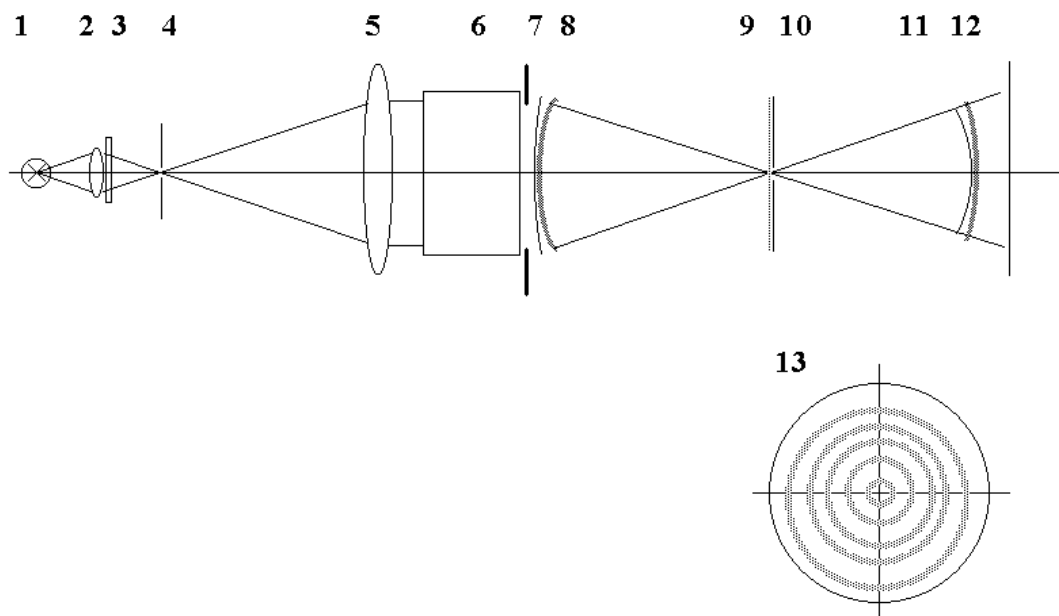


Рис.29. Интерферометрия aberrаций оптической системы методом Линника

1 - лампа, 2 - конденсор, 3 - светофильтр, 4 - точечная диафрагма, 5- коллиматорный объектив, 6 - исследуемая оптическая система, 7 - выходной зрачок, 8 - волновой фронт, сформированный исследуемой системой, 9 - пластинка Линника, 10 - светоделительное покрытие с точечной диафрагмой, 11 - исследуемый искаженный волновой фронт, 12 - дифрагированный сферический опорный фронт

К таким изделиям можно отнести оптические системы космических телескопов, современных исследовательских микроскопов, технологической аппаратуры микроэлектроники и оптико - электронных указывалось, ограничена, и при этом нет гарантии от неконтролируемого изменения точности образцового оптического элемента в процессе эксплуатации интерферометра.

Альтернативным направлением интерферометрии стало создание интерферометров, в которых опорный сферический волновой фронт создается путем дифракции пучка излучения, сфокусированного на точечной диафрагме, соизмеримой по диаметру с длиной волны. Первая известная схема такого рода была предложена академиком Линником [19] (рис. 29).

Здесь дифрагирующее отверстие в полупрозрачном оптическом покрытии устанавливается в плоскости пятна рассеяния, сформированного испытуемой оптической системой в схеме контроля. Недостатки такого интерферометра с *совмещенными* ветвями состоят в сложной настройке, отличающейся от традиционной, невысоком качестве интерференционной картины и определенных сложностях ее интерпретации.

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и разнесенными ветвями [18, 20] (рис. 30).

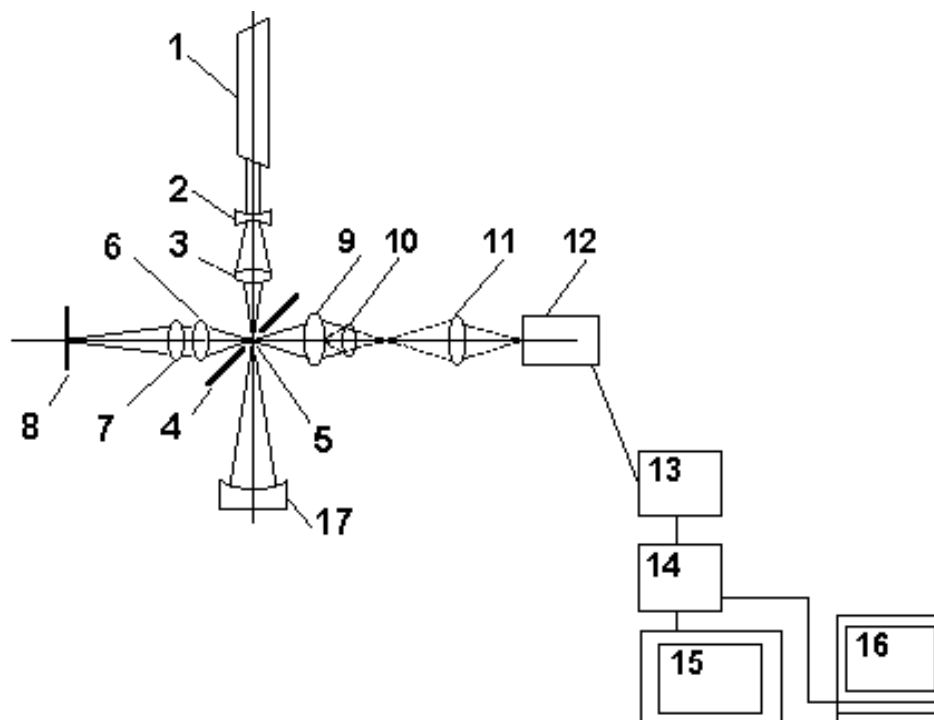


Рис.30. Неравноплечий интерферометр с дифрагированным опорным фронтом

1 - лазер, 2 - 3 -осветительная система, 4 - наклонное зеркало, точечная диафрагма, 6 и 7 - встречные коллиматорные объективы, 8 - плоское автоколлимационное зеркало, 9 -11 - наблюдательный микроскоп с линзой Бертрана, 12 - видеокамера, 13 - блок обработки изображения, 14 - блок выделения центров интерференционных полос, 15 - телевизионный монитор, 16 - компьютер, 17 - измеряемая поверхность

Разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом и разнесенными ветвями для опорного и рабочего пучков. Этот прибор имеет традиционную методику настройки и интерпретации интерференционной картины, обеспечивает высокое качество интерферограммы, гибкость при исследовании оптических систем и элементов с различными коэффициентами пропускания (отражения) от 98% (зеркальные покрытия) до 0.15 % (просветляющие покрытия).

Общий вид дифракционного интерферометра для исследования оптики микроскопов показан на рис. 27, 33, 37. 38 в Части 5 данного пособия. Прибор отличается отсутствие образцовых оптических элементов и ошибок их изготовления, конструктивная простота, малогабаритность и легкость в эксплуатации. Итак, в данных дифракционных интерферометрах генерация неискаженного сферического эталонного фронта волны основана на использовании хорошо воспроизводимого физического явления дифракции лазерного пучка на точечном отверстии диаметром, соизмеримым с длиной волны. В этих приборах отсутствует образцовая оптическая деталь и присущие ей неизбежные остаточные погрешности, возникающие при изготовлении.

Точечное отверстие служит источником дифракционной волны, которая является опорной. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения эталонной сферической волны, возникающей при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности.

Благодаря такому выполнению светоделителя в интерференционной картине устраняются паразитные изображения, возникающие в обычных светоделительных элементах.

Это обстоятельство позволяет во многих случаях повысить точность и надежность интерференционного контроля. Благодаря тому, что дифракционная волна образуется на точечном отверстии, отпадает необходимость изготовления сферической эталонной поверхности, требования к которой в традиционных интерферометрах ограничивают достижимую точность измерения.

Возможность создания технологии фотолитографии, позволяющей формировать элементы топологии микросхем на уровне $a_{\min} = 30 \div 65$ нм, связана в первую очередь с возможностью изготовления объективов для технологии, основанной на длине рабочей волны $\lambda_p = 0,0134$ мкм [17].

Технология изготовления прецизионных оптических элементов с использованием комбинированного метода, основанного на совместном использовании нескольких методов обработки асферических поверхностей с различным способом формирования поверхностей, например, сочетание ножевого метода обработки и метода малого инструмента. Такой метод позволяет получить точность поверхности на уровне $\lambda/20 - \lambda/30$ для $\lambda_k = 0,633$ мкм, где λ_k – длина волны излучения, применяемая в приборах контроля. Здесь точность ограничена только точностью эталонов, применяемых в классических интерферометрах, например «Zygo».

При решении задачи создания объектива для экстремального ультрафиолета (ЭУФ) необходимо иметь возможность контролировать ошибки с точностью $\lambda_p/10 - \lambda_p/20$. Указанное обстоятельство приводит к тому, что при контроле на других длинах волн необходимо:

- Анализировать ошибки волнового фронта на уровне $0,01\lambda_k$ при использовании $\lambda_k = 0,248$ мкм. В случае применения $\lambda_k = 0,633$ мкм. требуемая точность интерферометра должна быть ориентирована на определение ошибки, составляющей $0,001\lambda_k$.
- Учитывать корреляцию между контрольной и рабочей длинами волн. Данное обстоятельство связано с физическими свойствами покрытия элементов объектива, которые могут вносить ошибку в фазу волнового фронта.

В качестве средства контроля объектива предлагается использовать лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом (PDI) [21, 22]. В приборах данного типа генерация эталонного фронта основана на использовании дифракции лазерного пучка на точечном отверстии с диаметром, соизмеримым с длиной волны, что, в соответствии с теорией дифракции, является условием для формирования идеального сферического волнового фронта.

Диаметр отверстия, генерирующего эталонный волновой фронт, рассчитывается по формуле:

$$d = \frac{1.22 \cdot \lambda_k}{3NA}, \quad (24)$$

где λ_k – контрольная длина волны,

NA – апертура фокусирующего объектива.

В таблице рассмотрена зависимость диаметра дифракционного отверстия от апертуры и контрольной длины волны.

Таблица 5. Диаметр дифракционного отверстия

Апертура фокусирующего объектива, NA	Диаметр отверстия, мкм.		
	$\lambda=0.633$ мкм	$\lambda=0.365$ мкм	$\lambda=0.248$ мкм
0.1	2.57	1,5	1
0.2	1.29	0,7	0,5
0.3	0.85	0,5	0,3

Отклонение от сферичности волнового фронта выходящего из отверстия определяется по формуле, полученной с учетом теории Дебая и справедливой на таких расстояниях от диафрагмы, которые не менее, чем на три порядка превышают размер отверстия [23]:

$$\Delta w = \frac{d^2}{\lambda \cdot s}, \quad (25)$$

λ – рабочая длина волны, d – диаметр отверстия, s – расстояние от экрана.

На рис.31 представлена зависимость отклонения эталонного волнового фронта от сферы в зависимости от его удаления от экрана.

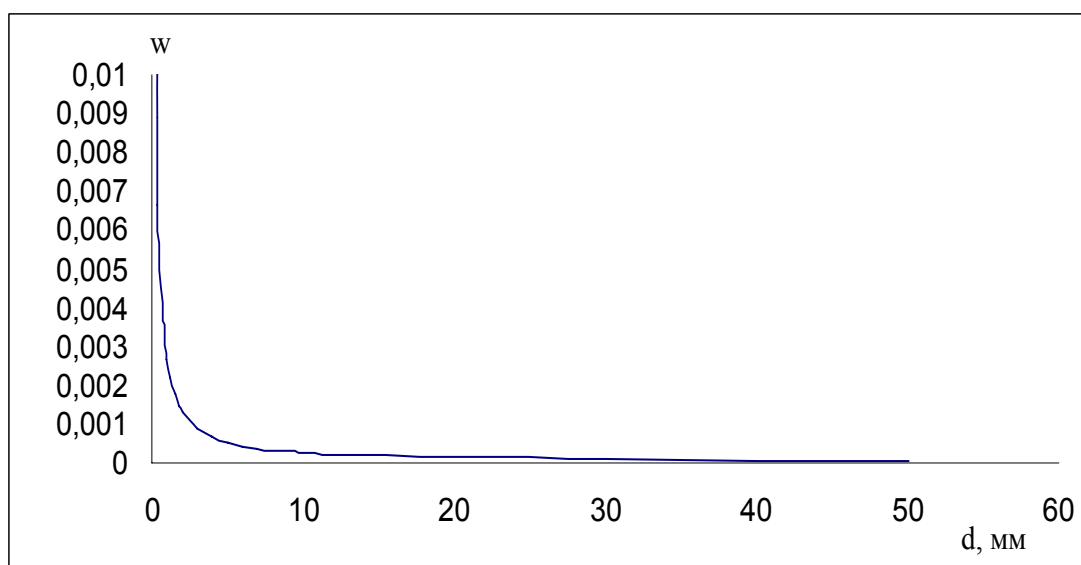


Рис 31. График зависимости отклонения от сферичности эталонного волнового фронта в зависимости от расстояния от экрана

Для контроля асферических поверхностей предусмотрены два способа:

- использование анаберрационных схем контроля с применением технологических зеркал, изготовленных под данный интерферометр;
- применение коррекционного объектива, также изготовленного и аттестованного под данный интерферометр.

Компенсационный метод, построенный на применении объективов, формирующих заданный волновой фронт, для решения данной задачи не подходит, так как оптические детали, входящие в состав объектива, будут вносить собственные ошибки вследствие наличия свилей, пузырности и т.д.

Для построения схем контроля зеркал на основе анаберрационных схем контроля асферических поверхностей контроля 2-го порядка необходимо подобрать такую асферику 2-го порядка, чтобы ее отступление от асферики высшего порядка не превышало 3 мкм, что соответствует 6 интерференционным полосам. В первом приближении отступление между асфериками находится как разность между соответствующими уравнениями. Хотя данный метод не является достаточно точным, но вследствие того, что деформации поверхностей являют собой величины очень малого порядка, ошибка вычисления составляет менее 1% по сравнению с методом, основанным на вычислении нормалей к поверхностям.

Показано, что расчетные отступления этих поверхностей не превышают 0,01 мкм.

Так, исследование выпуклого зеркала №2 может быть с необходимой точностью выполнено в схеме по рис.30 в рабочей ветви дифракционного интерферометра.

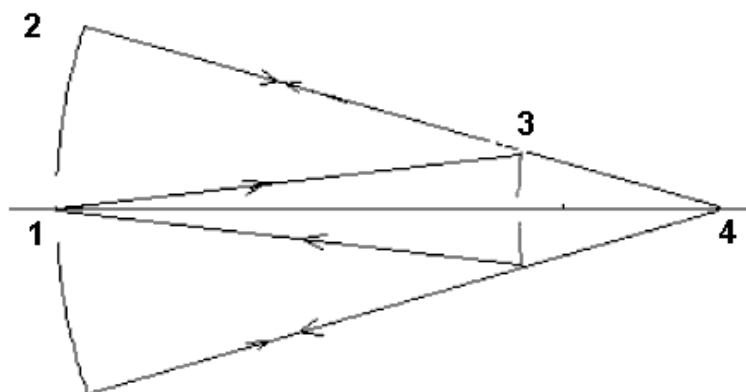


Рис.32. Схема контроля оптической поверхности на базе выпуклого гиперboloида

1 – рабочая точка интерферометра, 2 - автоколлимационное сферическое зеркало, изготовленное с необходимой точностью под безэталоный дифракционный интерферометр, 3 – исследуемое зеркало, 4 – мнимый фокус гиперboloида

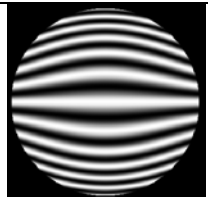
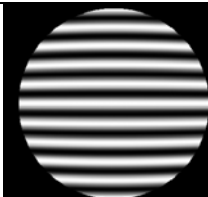
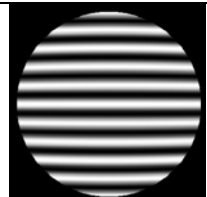
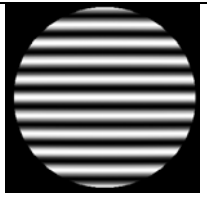
Итак, в последние годы наблюдается устойчивый интерес к проблеме создания оптических элементов с точностью формы поверхностей на уровне долей нанометра. При решении задач проекционной коротковолновой нанолитографии проблема усложняется тем, что, как правило, необходимо изготавливать асферические поверхности, у которых одновременно с высокой точностью формы необходимо обеспечить и низкую, на уровне 0,1 нм,

микрошероховатость поверхности. Традиционные методы обработки оптических поверхностей, как правило, не обеспечивают такой точности, поэтому в последнее время развиваются методы коррекции формы, использующие автоматизированные комплексы с ионным травлением или нанесением тонких пленок в вакууме с заданным распределением толщины пленок по поверхности. Следует отметить, что при практике применения этих методов необходимо сохранение, а лучше и уменьшение микрошероховатости поверхности.

Процесс коррекции формы является итерационным, и на каждой стадии коррекции необходимо иметь оперативные и адекватные по точности методы измерений. В настоящее время такие точности обеспечивают интерферометры с дифракционной волной сравнения, в которых эталонная сферическая волна формируется в результате дифракции на точечном отверстии с диаметром, сравнимым с рабочей длиной волны. До недавнего времени существовало два способа формирования эталонной сферической волны. Первый, предложенный Линником в 1933 г., развитый в работах Виноградовой Г.Н. [23-24] и применяемый рядом групп исследователей, заключается в использовании отверстий малого диаметра (pin – hole) в металлической пленке, нанесенной на тонкую прозрачную подложку. Второй способ использует дифракцию на выходе одномодового оптического волокна. Поскольку сферическая волна генерируется в пределах дифракционного пика, угловая ширина которого составляет λ/d (λ – длина волны, d – диаметр отверстия), первый метод должен позволять измерять оптические поверхности с большой числовой апертурой (при $d \approx \lambda$, числовая апертура $NA \approx 1$). Второй метод из-за большего диаметра отверстия (сердечника) оптоволокна ($d \approx 5$ мкм) в принципе не позволяет измерять оптику с $NA > 0.1$. Однако метод Линника не позволяет изучать оптику с высокими числовыми апертурами ввиду невысокого качества получаемых интерферограмм и неоднозначности физических процессов связанных с зависимостью условий формирования волны сравнения от aberrаций контролируемого элемента.

Известно, что коэффициенты Цернике увеличиваются или уменьшаются для одной и той же оптической системы в зависимости от длины волны. В качестве примера можно рассмотреть модель интерферограммы характеризующие волновой фронт, имеющий ошибку типа комы равную 13.4 нм.

Таблица 5. Моделирование формы интерферограммы для различных длин волн при одном и том же числе полос

контрольная длина волны, λ	13.4 нм	193 нм	248 нм	633 нм
изображение интерферограммы				
значение ошибки в волновой мере	$C31 = 1\lambda$	$C31 = 0.07\lambda$	$C31 = 0.05\lambda$	$C31 = 0.02\lambda$

Мы видим, что для волнового диапазона $193 \div 633$ нм порядок анализируемой ошибки практически одинаков. Но для $\lambda_k = 0.633$ мкм ошибка превышает за точность эталонов, применяемых в современных интерферометрических комплексах ZYGO, где, как известно, точность эталона составляет $\lambda/20$ для $\lambda_k = 0.633$ мкм, а интерферометров, изготовленных для работы на более коротких длинах волн не существует.

В таблице 2 показаны коэффициенты разложения волновой аберрации объектива типа Шварцшильд экспериментального наноитографа на рабочей длине волны $\lambda_p = 13.4$ нм для случая центрированной системы. При вычислении коэффициентов Цернике центральное экранирование не учитывалось, т.е. аппроксимация аберраций была выполнена по полной апертуре.

Можно легко пересчитать коэффициенты с одной длины волны на другую и обнаружить, что в видимом диапазоне анализируемая ошибка намного меньше 0.01λ , для $\lambda_k = 0.633$ мкм.

Обоснование необходимости столь высокой точности контроля состоит в том, что аттестация элементов проекционных объективов для целей наноитографии на сегодняшний день может вестись только в видимой или близлежащей к ней области спектра. Это связано с невозможностью осуществления контроля на рабочей длине волны $\lambda_p = 13.4$ нм, ввиду полного отсутствия отражения от контролируемой детали без нанесения зеркального покрытия.

Таким образом, можно констатировать следующий факт: контроль элементов объективов должен проводиться в видимом диапазоне, как наиболее обеспеченном техническими решениями приборов контроля, а аттестационный контроль - на рабочей длине волны, после нанесения зеркального покрытия на основе Mo-Si, которое обеспечивает максимальный коэффициент отражения $R > 60\%$ для $\lambda_p = 13.4$ нм.

Таблица 6. Разложение волновой аберрации объектива по коэффициентам Цернике для $\lambda = 13.4$ нм

C_{nm}	Координаты на изображении		
	край поля	½ часть поля	центральная часть поля
20	-0.028	0.013	0.026
40	0.000	0.001	0.001
60	-0.002	0.013	0.001
11	-0.001	0.002	-
31	0.003	0.002	-
51	-0.005	-0.002	-
22	0.285	0.072	-
42	0.008	0.002	-

В связи с появлением направления развития проекционной литографии на длине волны 13.4 нм и разработкой тестовых стендов встала задача контроля соответствующих оптических элементов с нанометровой точностью [ссылка]. Для возможности реализации такой точности группами исследователей проведены следующие работы [23, 26]:

- разработка источника эталонной сферической волны, обеспечивающего измерение оптических поверхностей в числовой апертуре $NA > 0.3$,
- теоретическое изучение проблемы дифракции света на отверстии диаметром порядка длины волны в непрозрачном экране целью выяснить влияние реальных характеристик экрана и отверстия в нем на амплитудные и фазовые характеристики дифрагированного фронта,
- изучение различных схем построения интерферометра с дифракционной волной сравнения.

В последние годы, с развитием нанотехнологий, интерес к интерферометру с дифрагированной на точке опорной волной изобретенному В.К.Кирилловским с соавторами еще в 1975 году [20], обострился. Стали появляться схемы-аналоги. Существует вариант первичной схемы, использующий отверстие волоконного зонда в качестве генератора сферической волны (рис.33). Здесь дифрагирующее отверстие расположено на одной оси с падающим пучком, один из вариантов такой схемы представлен на рис.1. Основной недостаток такой схемы связан с тем, что используемое волокно дает мало света и работа ведется практически на уровне шумов матрицы. Кроме того, рабочая апертура такой схемы не превышает $NA = 0.24$, что недостаточно для решения существующих задач.

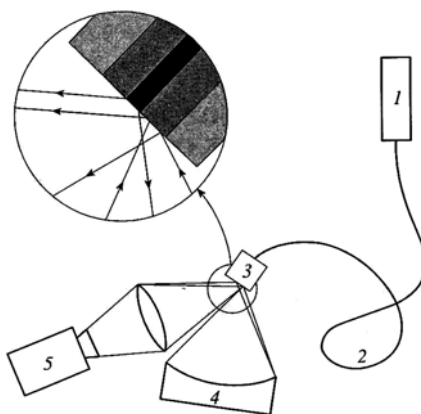


Рис. 33. 1 – He-Ne – лазер, 2 – одномодовое волокно, 3 – источник сферической волны (пластина с дифракционным отверстием), 4 – исследуемый образец, 5 – система регистрации интерференционной картины

Другой вариант схемы представлен на рис. 30. Здесь в качестве источника сферической волны используется диафрагма, повернутая под углом 45 градусов к падающему пучку. Главное достоинство этой схемы – высокая рабочая апертура, которая при прочих равных условиях в два раза выше по сравнению с существующими схемными решениями PDI – интерферометров. В процессе

работы с этой схемой был выявлено «паразитное» рассеянием излучения на боковой поверхности отверстия, если отверстие изготовлено с нарушением оптимальных параметров. Этот эффект влияет на структуру интерференционного изображения при уменьшении диаметра отверстия и увеличении толщины покрытия сверх нормы, поэтому изготавливают серию дифракционных препаратов и отбирают образцы с отверстиями, дающими наилучший результат, где остаточное светорассеяние пренебрежимо мало и не вызывает зашумленность интерференционного изображения.

Диаметр отверстия, генерирующего эталонный волновой фронт рассчитывается по формуле:

$$d = \lambda_k^2 / NA \quad (1)$$

λ_k – контрольная длина волны, NA – апертура фокусирующего объектива.

Отклонение от сферичности волнового фронта выходящего из отверстия определяется по формуле, полученной с учетом теории Дебая и справедливой на таких расстояниях от диафрагмы, которые не менее, чем на три порядка превышают размер отверстия [23]:

$$\Delta w = \frac{d}{\lambda s}, \quad (26)$$

где

λ – рабочая длина волны, d – диаметр отверстия, s – расстояние от экрана.

В табл. 7 рассмотрена зависимость диаметра дифракционного отверстия от апертуры и контрольной длины волны. На одну из поверхностей светоделителя светового пучка, выполненного в виде плоскопараллельной пластины 4, нанесено зеркальное покрытие, в центре которого имеется точечное отверстие 5, диаметр которого соизмерим с длиной волны излучения. Между лазером и светоделителем пучка расположен объектив 2-3, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием 5 на светоделителе пучка.

Таблица 7. Диаметр дифракционного отверстия

Апертура фокусирующего объектива, NA	Диаметр отверстия, мкм.		
	$\lambda=0.633$ мкм	$\lambda=0.365$ мкм	$\lambda=0.248$ мкм
0.1	4.01	1.33	0.62
0.2	2	0.66	0.31
0.3	1.34	0.44	0.21

Точечное отверстие служит источником дифракционной волны, которая является опорной. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения эталонной сферической волны, возникающей при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности.

Относительно формы и структуры дифрагированного волнового фронта

Для обоснования возможности использования волнового фронта, дифрагированного на малом отверстии, в качестве образцового фронта, важно знать основные факторы, определяющие возможные искажения, а также понять механизм их влияния на поведение амплитуды и фазы в дифрагированной волне.

Моделируемое угловое распределение интенсивности имеет максимум в центре при гауссовском законе распределения, не достигающем нулевого значения в пределах телесного угла $\pm 90^\circ$.

Для использования в интерферометре неоднородность по интенсивности не является серьезной помехой, так как практически такая же неоднородность наблюдается и во всех других интерферометрах, где используется лазерное излучение. Эта неоднородность приводит лишь к неравномерности освещенности интерферограммы, причем если использовать $2/3$ ширины эталонного пучка, то неравномерность, как известно, составит $\pm 25\%$, что для регистрации и ввода интерферограммы в компьютер, а также ее дальнейшей обработки вообще не имеет никакого значения.

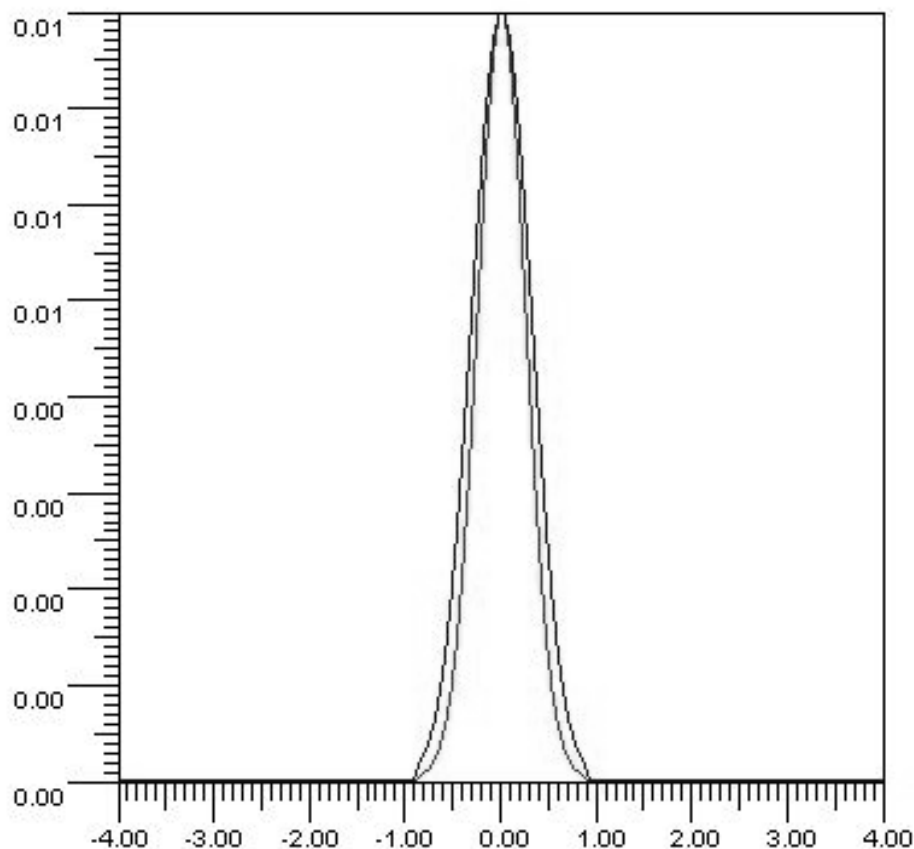


Рис. 34. Дальнепольное распределение интенсивности света, дифрагированного на отверстии диаметром 140 нм

Погрешность волнового фронта, образованного дифракцией на малом отверстии, весьма мала, так как эталонный волновой фронт – это поверхность постоянной фазы излучения, используемого уже в дальней зоне дифракции. Эта

поверхность является почти идеально сферической, причем отклонение волнового фронта от сферы в зависимости от расстояния определяется по формуле, полученной с учетом теории Дебая и справедливой на таких расстояниях от экрана, которые не менее, чем на три порядка превышают размер отверстия:

$$\Delta w = d^2 / (\lambda s),$$

где d – диаметр диафрагмы, λ – рабочая длина волны, s – расстояние от диафрагмы. При $d = 1$ мкм, $\lambda = 0.633$ мкм, а $s = 12$ мм (фокусное расстояние регистрирующей оптики) погрешность эталонного волнового фронта равна 0.00013 (λ), а среднеквадратическая погрешность (RMS), соответственно, равна 0.00004 (λ). Соотношение (1) не содержит угол, под которым наблюдается отверстие, поскольку эта формула, естественно, справедлива в полном угле нулевого порядка дифракции. Для указанного случая этот угол, определяемый формулой:

$$\sin \theta = \lambda / d, \quad (27)$$

равен $\theta = \arcsin 0.633 = 39^\circ$. При дальнейшем распространении ошибка отступления от сферичности становится еще меньше и, следовательно, в пределах угла дифракции по крайней мере ± 18 градусов имеем высококачественный сферический волновой фронт, числовая апертура которого равна $NA = 0.31$. Следует заметить, что вблизи угловых краев нулевого порядка дифракции фаза поля быстро меняется на 180 градусов, поэтому уверенное использование дифрагированного волнового фронта возможно в пределах $\pm 40\%$ от нулевого порядка, что, впрочем, является чисто технологическим вопросом.

Влияние угла наклона плоскости диафрагмы сказывается в эллиптичности углового распределения интенсивности из-за сужения проекции контура отверстия на плоскость, перпендикулярную оси дифрагированного пучка. Такой эффект должен находиться в полном согласии с теорией дифракции Фраунгофера, которая фактически описывает поле в дальней зоне дифракции. Этот эффект стабильно наблюдается при настройке. Поскольку наблюдается хорошее согласие для дальней зоны описаний распределения интенсивности поля в векторной и скалярной теориях, то следует логически ожидать и других совпадений, в частности практически полного постоянства распределения фазы в нулевом порядке дифракции.

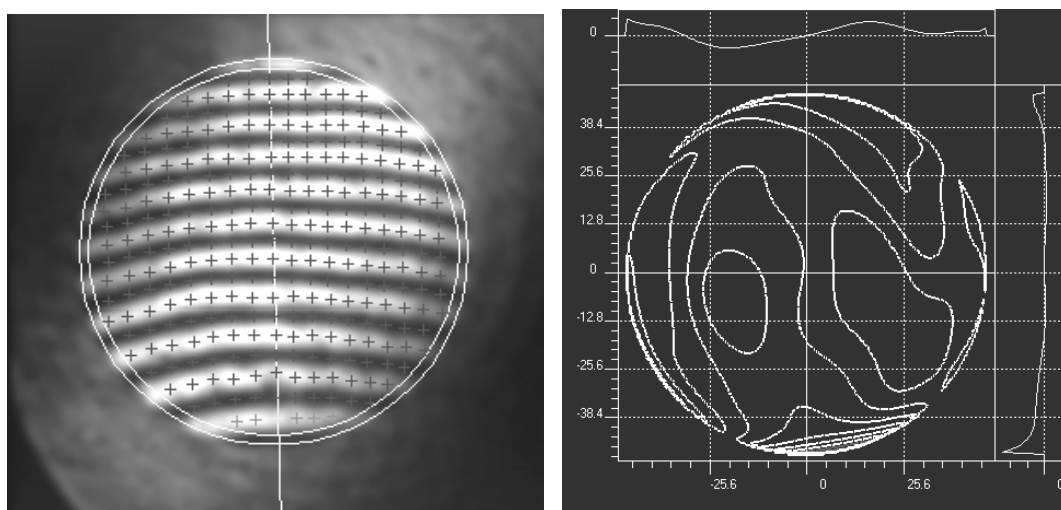
Исследование формы дифрагированного опорного фронта

С целью экспериментальной проверки, насколько стабильна сферическая форма дифрагированного волнового фронта, в работе исследована серия интерферограмм в амплитудном режиме поверхности одной и той же детали, рассматриваемой в дифракционном интерферометре под различными ракурсами. Изменялся угол наклона детали, продольное положение, перестраивалось угловое и поперечное положение *pinhole* диафрагмы. После обработки интерферограмм были получены карты профиля поверхности в виде

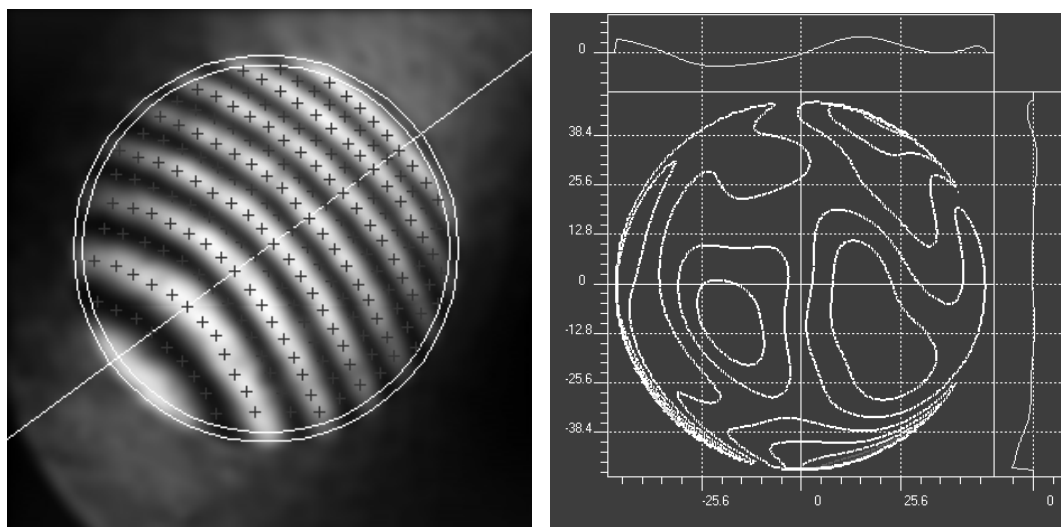
изолиний, а также значения размаха деформации (peak-to-valley) и среднеквадратической ошибки (RMS). В таблице приведены некоторые характерные результаты для различных ракурсов детали и различного количества полос (см. таб. 7), причем при изменении ракурса менялась также и настройка углового положения диафрагмы в пределах $\pm 4^\circ$. Рабочая длина волны He-Ne лазера 0.6328 нм.

Таблица 7

Число полос	10	8	13
Размах (P-V) (λ)	0.1529	0.1763	0.1607
Среднеквадр. ош. (RMS) (λ)	0.0179	0.0189	0.0185



а) б)
Рис.35. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б).



а) б)
Рис. 36. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б).

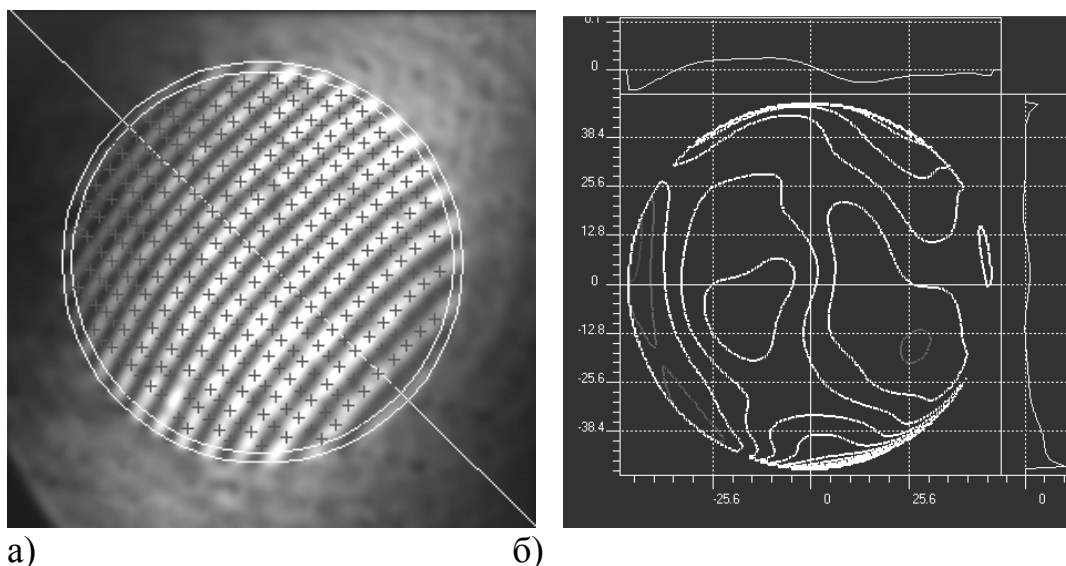


Рис. 37. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б)

Соответствующие образцы карт поверхности показаны на рисунках 35 – 37. Из полученных результатов следует, что, по крайней мере, с хорошей производственной точностью эталонный волновой фронт является поверхностью, форма которой не зависит ни от ракурса наблюдения, ни от изменения угла наклона плоскости диафрагмы, ни от положения детали в пределах 80%-ного угла от нулевого порядка дифракции.

Структура интерференционного изображения и точность измерений

Проблема состоит в том, что в лазерных интерферометрах реальная структура интерференционной картины существенным образом зависит от схемного решения интерферометра. Использование лазерного излучения трезует применения наиболее простых схемных решений. Включение в схему дополнительных оптических элементов, которое может пройти практически незамеченным с применением малокогерентного излучения, в лазерном излучении влечет за собой появление большого количества шумов в виде паразитных интерференционных элементов и спекловой зернистости. В этой ситуации PDI-интерферометр дает уникальные по чистоте и качеству интерференционные картины, что создает существенные дополнительные возможности повышения точности интерферометрии.

Другие интерферограммы характеризуются различной степенью зашумленности, которая приводит к искажению структуры интерферограммы (рис.13 а, б), вплоть до дробления интерференционных полос. В этом последнем случае средства компьютерного опознавания полосы и измерения ее координат дают отказ в работе, и опознавание полос возможно только визуально и интуитивно оператором измерений. Естественно, что указанные явления сопровождаются снижением надежности и повышением погрешностей контроля и измерений. В этом случае не может быть и речи о проведении исследований на пороге чувствительности метода, с полным использованием его точностных возможностей.

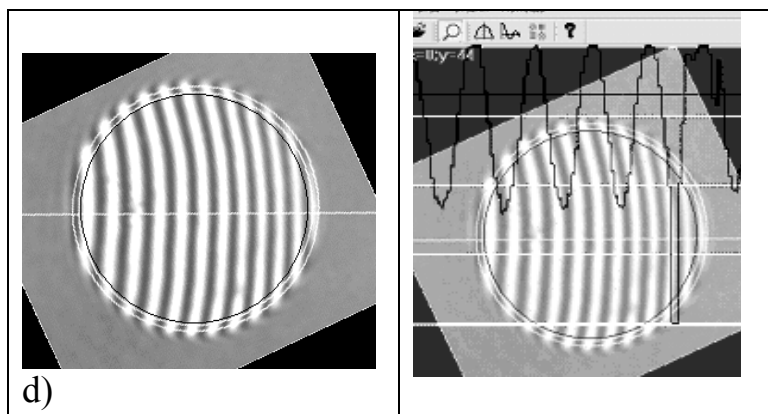


Рис.38. Структура интерферограммы для PDI- интерферометра

Качество интерферограммы и уровень опознавания полос

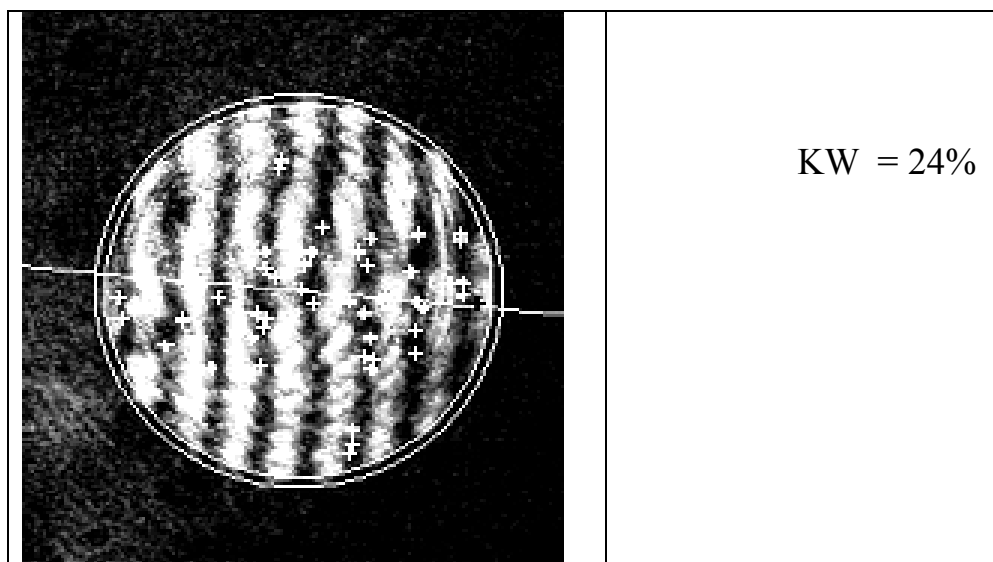
Исследование процесса опознавания полос, принадлежащих интерферограммам различного качества, полученных при помощи различных типов интерферометров, выполнялось в программе “ЗЕБРА - Матоптикс”.

Коэффициент качества опознавания KW вычислялся как

$$KW = NT / NG$$

где NT - число опознанных точек на интерферограмме;

NG - общее число точек опознавания на интерферограмме при заполнении полос.



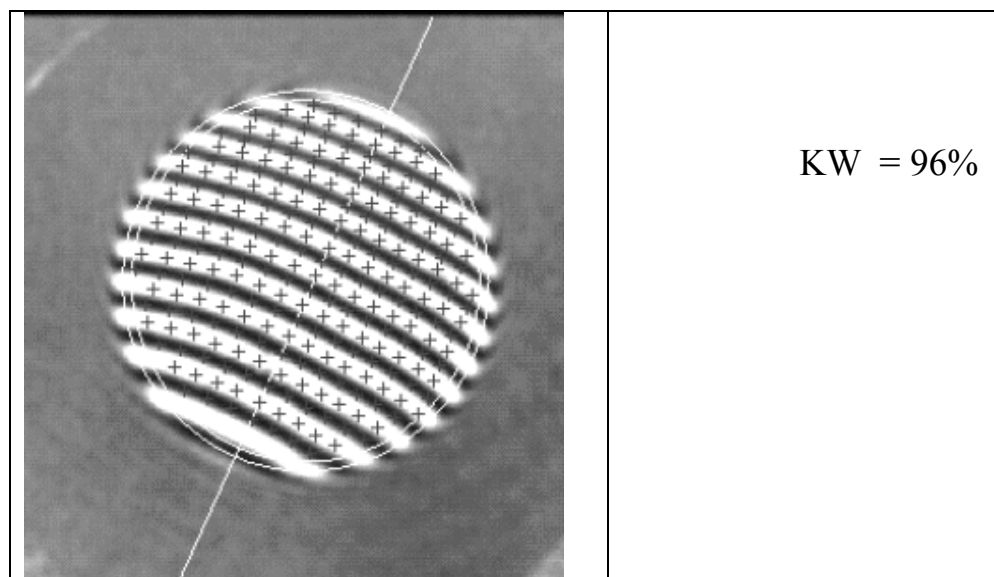


Рис.39. Степень автоматического опознавания интерференционных полос

Диаграмма взаимосвязи схемного решения интерферомера и показателя опознавания (в условиях отсутствия как оптической, так и электронной фильтрации шумов интерферограммы) приведена на рис.40.

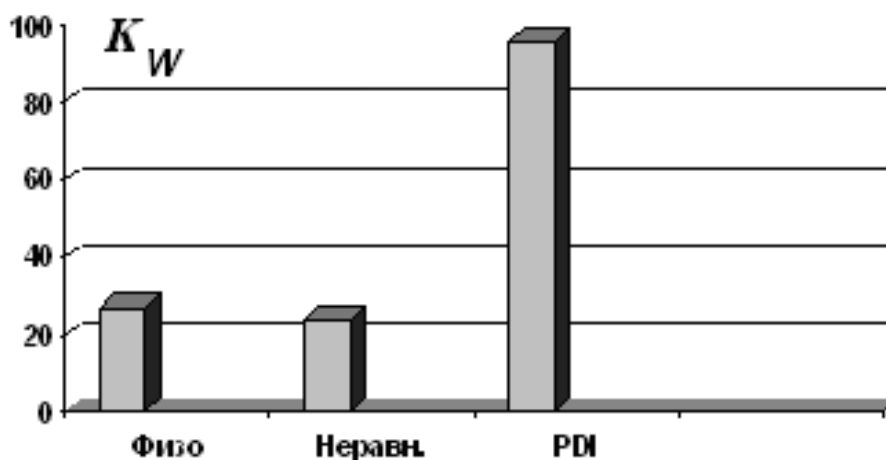


Рис.40. Диаграмма взаимосвязи схемного решения интерферомера и показателя уровня опознавания

Повышение точности отсчетов является и средством повышения точности измерения (в то время как в традиционных интерферометрах это лишь точность отсчитывания суммарных деформаций рабочего волнового фронта, имеющего неустранимую ошибку, связанную с неизвестной ошибкой образцовой детали).

В виду простоты и малогабаритности дифракционного интерферометра, он может служить элементом устройств для постоянного самоконтроля реальной точности образцовых элементов в традиционных интерферометрах в процессе их эксплуатации, в том числе – перед каждым сеансом контроля. Такой подход позволяет по-новому взглянуть на возможности и перспективы современной интерферометрии.

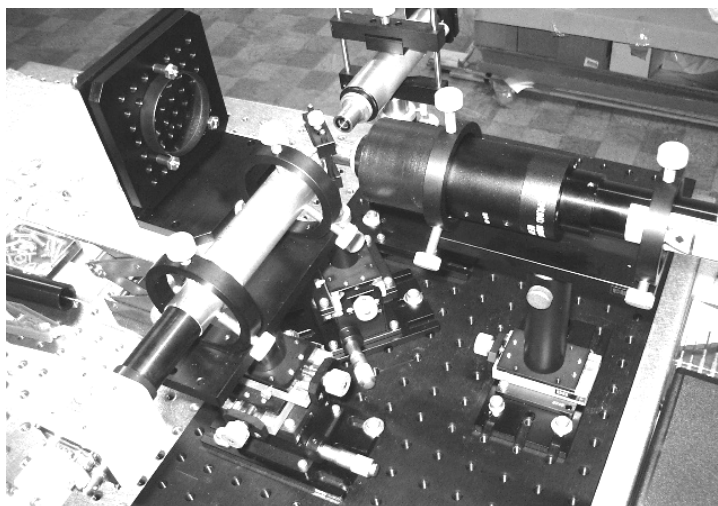


Рис. 41. Общий вид PDI-интерферометра для исследования оптических поверхностей

Высокоточная обработка и интерпретация сложных интерферограмм при исследовании зеркал нанообъектива

При стабильной работе PDI-интерферометра вся информация, извлекаемая из интерферограммы с помощью глубокой математической обработки, является полезной. Следовательно, чем лучше работает программное обеспечение, тем более высокой является точность результатов контроля оптики.

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРКАЛ НАНООБЪЕКТИВА

При контроле нано-асферик наблюдаются отступления от сферы или другой поверхности второго порядка в несколько десятков длин волн. Для того, чтобы использовать в полной мере преимущества PDI-интерферометра, создание нуль-корректоров для контроля асферики чаще всего неэффективно, так как при этом мы ограничиваем сами себя точностью изготовления этого корректора, которая экспериментально не может быть оценена лучше, чем это дают известные интерферометры типа Физо или Тваймана. Поэтому необходима разработка методов оценки интерференционной картины с большим количеством искривленных полос, которая формируется при использовании анаберрационных схем, где исследуемая поверхность высшего порядка заменяется ближайшей асферикой второго порядка. При этом приходится вести контроль с применением расшифровки интерферограмм, в которых искривления полос могут достигать 20 и более.

В практике таких измерений требуется применение более высоко разрешающей ПЗС матрицы, например, измерительной матрицы с количеством пикселей значительно более миллиона.

Подходящей методики, существует компьютерная технология обработки интерферограмм, базирующаяся на теории сигналов или, более конкретно, на методах обработки изображения.

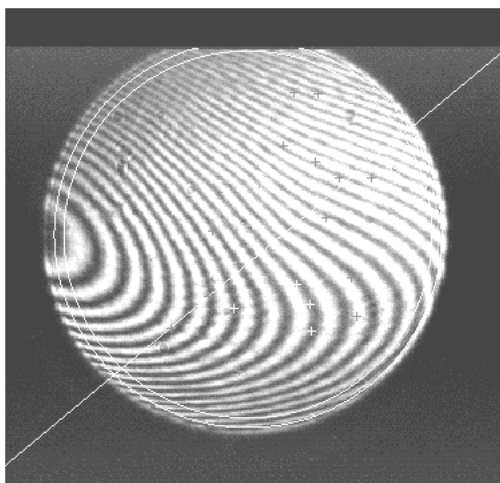


Рис.42. Интерпретационное решение обработки интерферограмм не может справиться с задачей восстановления поверхности с большими отклонениями от референтной сферы

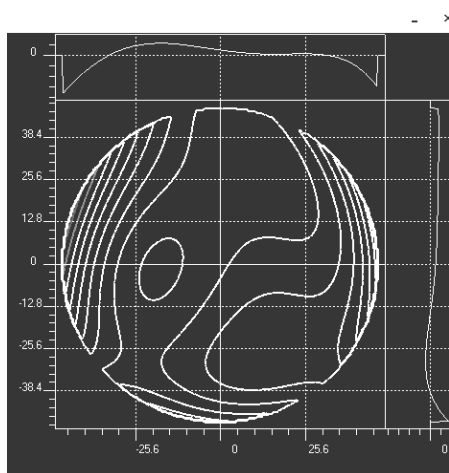


Рис.43. Карта оптической поверхности, сформированная при значительных отступлениях от сферичности

Эта технология представляет исключительно большой интерес в применении к дифракционному интерферометру, поскольку дает возможность восстановления фазы и формы контролируемой поверхности с высокой точностью независимо от сложности интерференционной картины.

Основное отличие методов, основанных на теории сигналов, заключается в возможности анализа асферических волновых фронтов высокого порядка, что дает им перспективу в использовании в качестве математического приложения к дифракционным интерферометрам.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ И СХЕМ КОНТРОЛЯ ПРИ СБОРКЕ И ЮСТИРОВКЕ 2-Х ЗЕРКАЛЬНОГО ПРОЕКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА

- 1) Вторичное вогнутое зеркало (с поверхностью на основе ближайшей сферы), изготовленное с необходимой точностью под контролем дифракционного интерферометра и снабженное

отражающим покрытием, устанавливается в схему объектива (в штатное положение).

- 2) Первичное зеркало (с поверхностью на основе ближайшего выпуклого гиперboloида) устанавливается в схему объектива (в штатное положение) и контролируется на этапе доводки его поверхности до расчетной точности под контролем дифракционного интерферометра, после чего снабжается отражающим покрытием.
- 3) Юстировка собранного нанообъектива выполняется под контролем дифракционного интерферометра в два этапа:
- 4) Этап 3-а – используется схема согласно рис. 44.

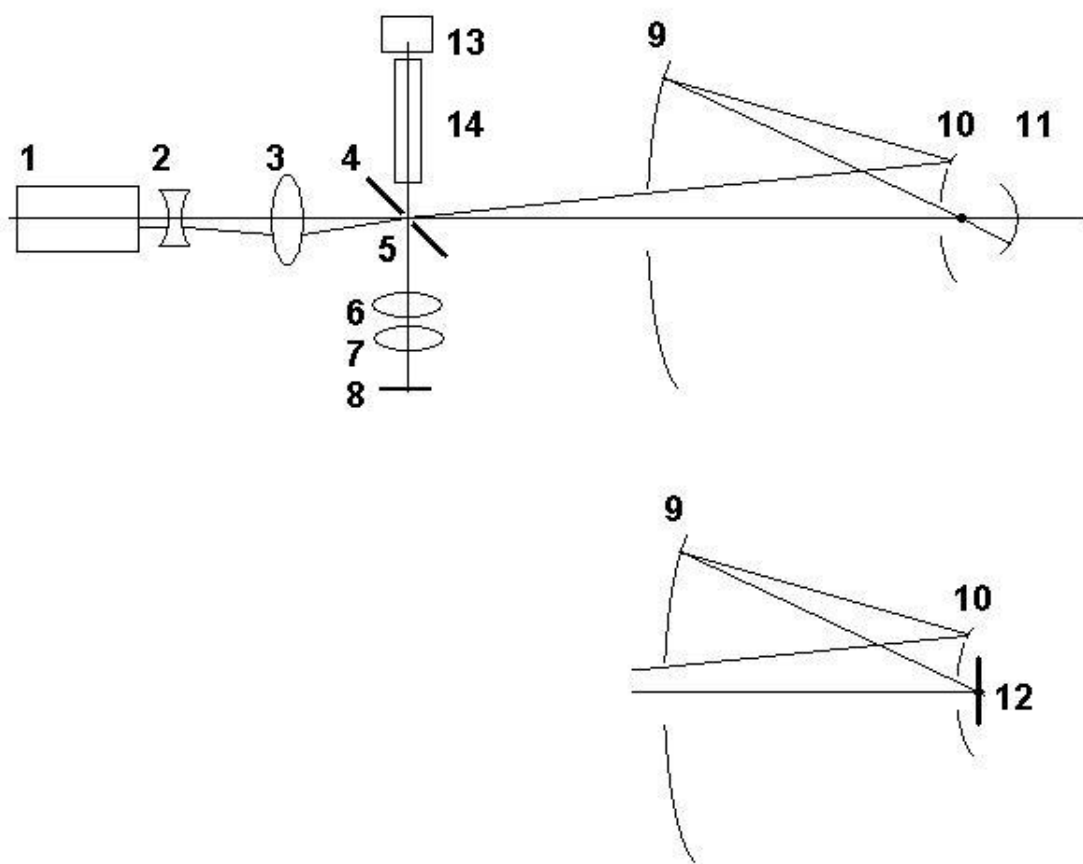


Рис. 44. Схема контроля 2-х зеркального проекционного нанообъектива

1- лазер, 2 -3 – осветительная система, 4 – наклонное зеркало с дифрагирующим микронным отверстием, 5, 6 - 8 – автоколлимационная осветительная система, 9 -10 – зеркала нанообъектива, 11 – автоколлимационное технологическое сферическое зеркало, 12 – автоколлимационное технологическое плоское зеркало

С целью устранения трудностей при контроле, связанных с большими отклонениями рабочего волнового фронта от опорного и формированием интерферограммы сложной формы, предусматривается следующий порядок сборки и юстировки. Рабочая точка 5 дифракционного интерферометра совмещена с осевой точкой плоскости объекта. Осевая точка плоскости изображения совмещена с центром кривизны технологического сферического автоколлимационного зеркала 11.

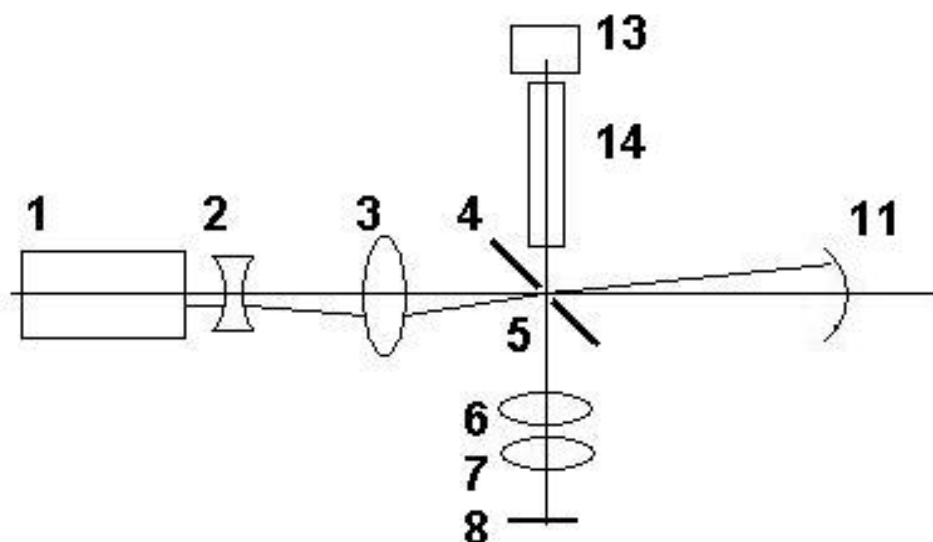


Рис. 45. Малое автоколлимационное сферическое зеркало 11 изготавливается под контролем дифракционного безэталоного интерферометра с необходимой точностью по схеме согласно рис. 2

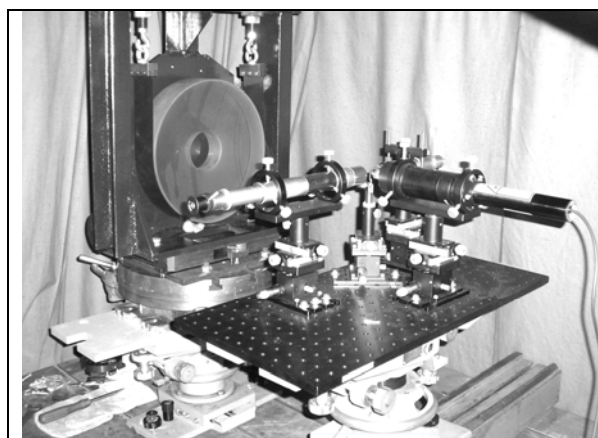


Рис. 46. Установка контроля вторичного вогнутого зеркала (с поверхностью на основе ближайшей сферы); установка построена на основе PDI – интерферометра (конфигурация на базе комплекса унифицированных узлов фирмы EDMUND)

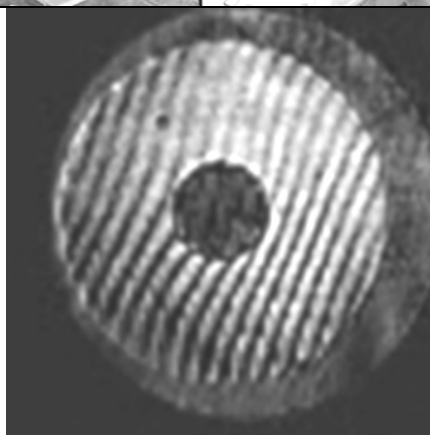
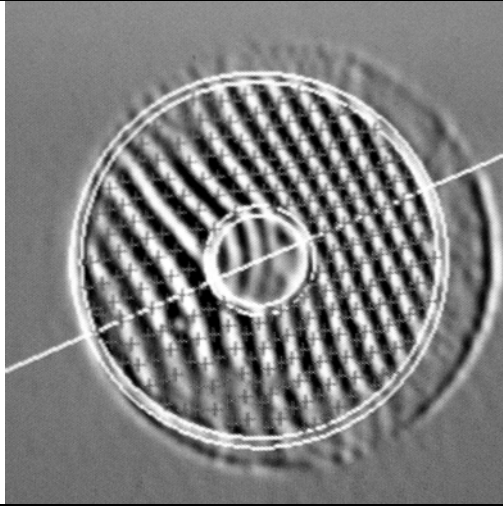
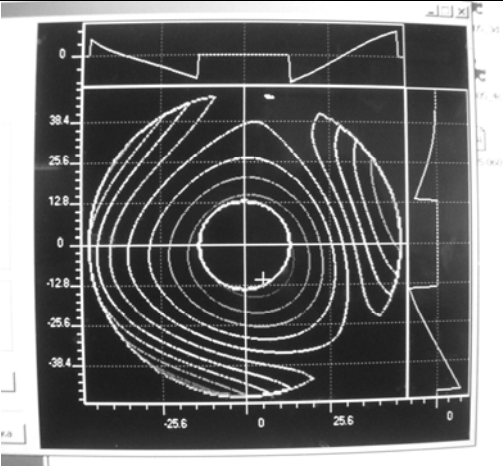


Рис.47. Интерферограмма вторичного зеркала на промежуточном этапе обработки.

	Рис. 48. Компьютерная обработка интерферограммы в программном пакете ZEBRA MathOptics. Этап автоматического опознавания координат полос.
	Рис. 49. Компьютерная обработка интерферограммы в программном пакете ZEBRA MathOptics. Этап автоматического расчета и отображения карты деформаций поверхности зеркала.

5. Этап 3b - После завершения этапа доводки первичного зеркала и устранения асимметричных аберраций юстировки, окончательная юстировка объектива на соответствие расчету выполняется с применением плоского технологического зеркала 12, установленного в плоскости изображения для нанообъектива.

Так как в данной схеме плоское зеркало работает участком своей поверхности диаметром порядка 1 мкм, этот вариант схемы контроля является практически безэталонным, то есть погрешности рабочего участка поверхности зеркала пренебрежимо малы.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАНОЛИТОГРАФА

Изменение год от года минимального размера элементарной полосы, формирующей фрагменты интегральных схем (нижний уровень) и рост уровня интеграции схем (верхний уровень) описывают так.

Прослеживая развитие фотолитографических процессов, мы видим, что к 2013 г. минимальный размер элемента микросхемы должен составлять величину порядка 30 нм при использовании технологии, связанной с использованием процессов в экстремально – ультрафиолетовом диапазоне.

Уровни последних лет:

Таблица 8

2000 г.		
Pentium IV	$4.42 \cdot 10^6$	0.18 мкм стандарт
Pentium IV Northwood	$5.5 \cdot 10^7$	0.18 мкм стандарт
2003		
Pentium IV Northwood	$1.2 \cdot 10^8$	0.09 мкм стандарт
SRAM	$3.3 \cdot 10^8$	0.09 мкм стандарт
2006		
Прогноз Альберта Ю. Intel	$3.5 \cdot 10^8$	

Исходя из того, что оптически прозрачные материалы для такого диапазона отсутствуют, в качестве основного инструмента должны быть использованы зеркальные объективы.

Достижение необходимого высокого разрешения порядка 30 нм возможно только при использовании в указанных объективах асферических поверхностей

В качестве базового объектива для исследования технологических процессов, как показано, используется объектив, построенный по схеме Шварцшильда (рис. 50).

КОНТРОЛЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БАЗОВОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАНОЛИТОГРАФИИ

В последние годы наблюдается устойчивый интерес к проблеме создания оптических элементов с точностью формы поверхностей на уровне долей нанометра. При решении задач проекционной коротковолновой нанолитографии проблема усложняется тем, что, как правило, необходимо изготавливать асферические поверхности, у которых одновременно с высокой точностью формы необходимо обеспечить и низкую, на уровне 0.1 нм, микрошероховатость поверхности. Традиционные методы обработки оптических поверхностей, как правило, не обеспечивают такой точности, поэтому в последнее время развиваются методы коррекции формы, использующие автоматизированные комплексы с ионным травлением или нанесением тонких пленок в вакууме с заданным распределением толщины пленок по поверхности. Следует отметить, что при практике применения этих методов необходимо сохранение, а лучше и уменьшение микрошероховатости поверхности.

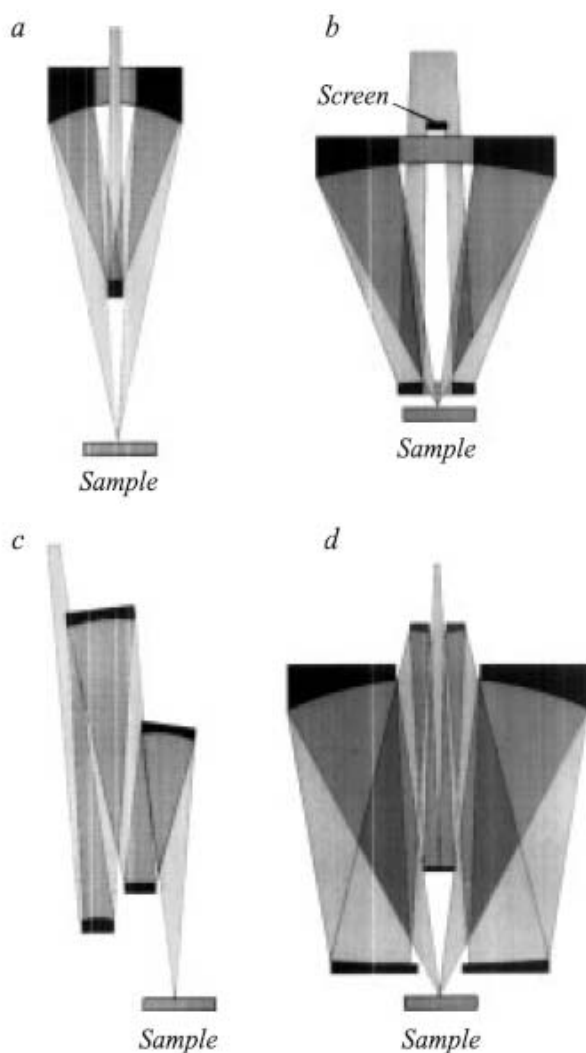


Рис. 50 . Примеры схем объективов, построенных по схеме Шварцшильда

- a – низкоапертурный двухзеркальный объектив, $NA < 0.2$
- b – высокоапертурный двухзеркальный объектив, $NA > 0.3$
- c- низкоапертурный объектив, промышленного типа, $NA < 0.2$
- d – высокоапертурный четырехзеркальный объектив, $NA > 0.5$

Процесс коррекции формы является итерационным, и на каждой стадии коррекции необходимо иметь оперативные и адекватные по точности методы измерений. В настоящее время такие точности обеспечивают интерферометры с дифракционной волной сравнения, в которых эталонная сферическая волна формируется в результате дифракции на точечном отверстии с диаметром, сравнимым с рабочей длиной волны.

Показано, что в видимом диапазоне анализируемая ошибка намного меньше 0.01λ , для $\lambda_k = 0.633$ мкм.

Обоснование необходимости столь высокой точности контроля состоит в том, что аттестация элементов проекционных объективов для целей нанолитографии на сегодняшний день может вестись только в видимой или близлежащей к ней области спектра. Это связано с невозможностью

осуществления контроля на рабочей длине волны $\lambda_p = 13.4$ нм ввиду полного отсутствия отражения от контролируемой детали без нанесения зеркального покрытия.

Таким образом, можно констатировать следующий факт: контроль элементов объективов должен проводиться в видимом диапазоне, как наиболее обеспеченном техническими решениями приборов контроля, а аттестационный контроль - на рабочей длине волны, после нанесения зеркального покрытия на основе Mo-Si, которое обеспечивает максимальный коэффициент отражения $R > 60\%$ для $\lambda_p = 13.4$ нм.

В связи с появлением направления развития проекционной литографии на длине волны 13.4 нм и разработкой тестовых стендов встала задача контроля соответствующих оптических элементов с нанометровой точностью. Для возможности реализации такой точности группами исследователей проведены следующие работы [26]:

1. разработка источника эталонной сферической волны, обеспечивающего измерение оптических поверхностей в числовой апертуре $NA > 0.3$,
2. теоретическое изучение проблемы дифракции света на отверстии диаметром порядка длины волны в непрозрачном экране целью выяснить влияние реальных характеристик экрана и отверстия в нем на амплитудные и фазовые характеристики дифрагированного фронта,
3. изучение различных схем построения интерферометра с дифракционной волной сравнения.

Базовые схемы PDI – интерферометра показаны ранее .

Непревзойденным по точности и техническим характеристикам остается наш интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и автоколлимационным осветительным плечом.

Итак, на сегодня для изготовления высокоточных поверхностей (систем) необходимо использовать метрологические средства повышенной точности. Дифракционный интерферометр, несомненно, является таковым. Отсутствие эталонной поверхности, ограничивающей точность измерений, позволило переступить традиционный порог в $\lambda/20$, однако для уверенного использования прибора в технологическом процессе необходимо исследовать реальную точность прибора и экспериментально оценить погрешность проводимых с его помощью измерений.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АППАРАТУРЫ КОНТРОЛЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ОДНОГО ЗЕРКАЛА ДРУГИМ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОГО (малого) ЗЕРКАЛА

Анализ параметров схемы объектива показал, что допустима компенсация геометрического профиля одного зеркала другим в процессе доводки профиля поверхностей..

При изменении параметра первого зеркала удастся скомпенсировать это изменение приращением аналогичного параметра второго зеркала.

Компенсация параметров проходит без существенного изменения качества оптического изображения, что видно из приведенных диаграмм и соответственно графиков ЧКХ номинальной системы и возмущенной.

Помимо ошибок изготовления геометрического профиля, дополнительный вклад в деформацию волнового фронта вносят погрешности установки одного зеркала относительно другого. Децентрировка вторичного зеркала вызывает главным образом кому и астигматизм. Кома, вызванная поперечным смещением вторичного зеркала может быть скомпенсирована его наклоном, при этом астигматизм не компенсируется, а складывается.

Рассмотрены отклонения геометрического профиля поверхностей и возможные отклонения, вызванные децентрировкой элементов друг относительно друга.

Необходимо отметить, что иметь адекватные средства контроля средства контроля на $\lambda_p = 0,0134$ мкм отсутствуют. В этом случае, при использовании классических средств контроля анализируемая величина ошибки.

Влияние угла наклона плоскости диафрагмы должно сказываться в эллиптичности углового распределения интенсивности из-за сужения проекции контура отверстия на плоскость, перпендикулярную оси дифрагированного пучка. Такой эффект должен находиться в полном согласии с теорией дифракции Фраунгофера, которая фактически описывает поле в дальней зоне дифракции.

Поскольку наблюдается хорошее согласие для дальней зоны описаний распределения интенсивности поля в векторной и скалярной теориях, то следует логически ожидать и других совпадений, в частности практически полного постоянства распределения фазы в нулевом порядке дифракции, который вытекает из описания дифрагированного поля в приближении Фраунгофера при помощи интеграла Дебая, что эквивалентно преобразованию Фурье в угловых пространственных частотах.

Схема описанного выше PDI - интерферометра позволяет контролировать элементы объектива в режиме автоколлимации. Но, например, если требуется контролировать волновой фронт всего объектива, а не только его отдельных компонентов, необходимо использовать дополнительное высококачественное

сферическое зеркало, что, безусловно, усложняет контрольную схему и вносит дополнительные деформации в волновой фронт анализируемого объектива. Для того, чтобы избежать дополнительных ошибок при контроле всего объектива необходимо анализировать волновой фронт на проход. Для этого, например, можно использовать интерферометр сдвига, но, в чистом виде, интерферометр сдвига неудобен в работе, так как он требует определения величины сдвига с точностью до 4 знака после запятой для корректной расшифровки волнового фронта [27].

В то же время, оказалось возможным преодолеть это обстоятельство, соединив интерферометр сдвига с дифракционным интерферометром получив дифракционно – сдвиговый интерферометр.

Дифракционно – сдвиговый интерферометр

Схема такого интерферометра показана на рисунке 51. Схему работы такого интерферометра можно представить себе следующим образом. Дифракционный интерферометр (PDI) формирует идеальный волновой фронт, в соответствии с теорией векторной дифракции, сферическая волна, сформированная точечным отверстием PDI - интерферометра, падает на дифракционную решетку, установленную нормально к оптической оси, дифракционная решетка порождает ряд дифрагированных волн, после прохождения исследуемого объектива волновой фронт концентрируется в плоскости изображения. В плоскости изображения установлена диафрагма, имеющая дифракционное отверстие, куда фокусируется центральный максимум, что формирует идеальный волновой фронт и, соответственно, окно предназначенное для прохождения 1 максимума, представляющего aberrированный волновой фронт объектива. Тогда, в результате суперпозиции двух волновых фронтов образуется интерференционная картина, подобная интерференционной картине Ронки.

Устройство интерферометра достаточно простое и он может устанавливаться на место ножа Фуко.

Итак, интерферометрический контроль позволяет, измерив карту деформации волнового фронта в выходном зрачке исследуемого объектива, рассчитать структуру и характеристики качества изображения объекта и определить пороговое разрешение.

Для исследования объективов предназначенных для формирования наноструктур необходим интерферометр с погрешностью волнового фронта лучше, чем $\lambda_k = 0.001$.

Указанная чувствительность достигается при использовании интерферометров, в которых опорный волновой фронт формируется путем дифракции светового пучка, сфокусированного на малом точечном отверстии диаметром 2-3 λ (PDI - интерферометры). Интерферометр данного типа может быть использован как при контроле исследуемого объектива и его элементов, так и для контроля ошибок изготовления образцовых оптических деталей в интерферометрах классического типа (схемы Тваймана или Физо).

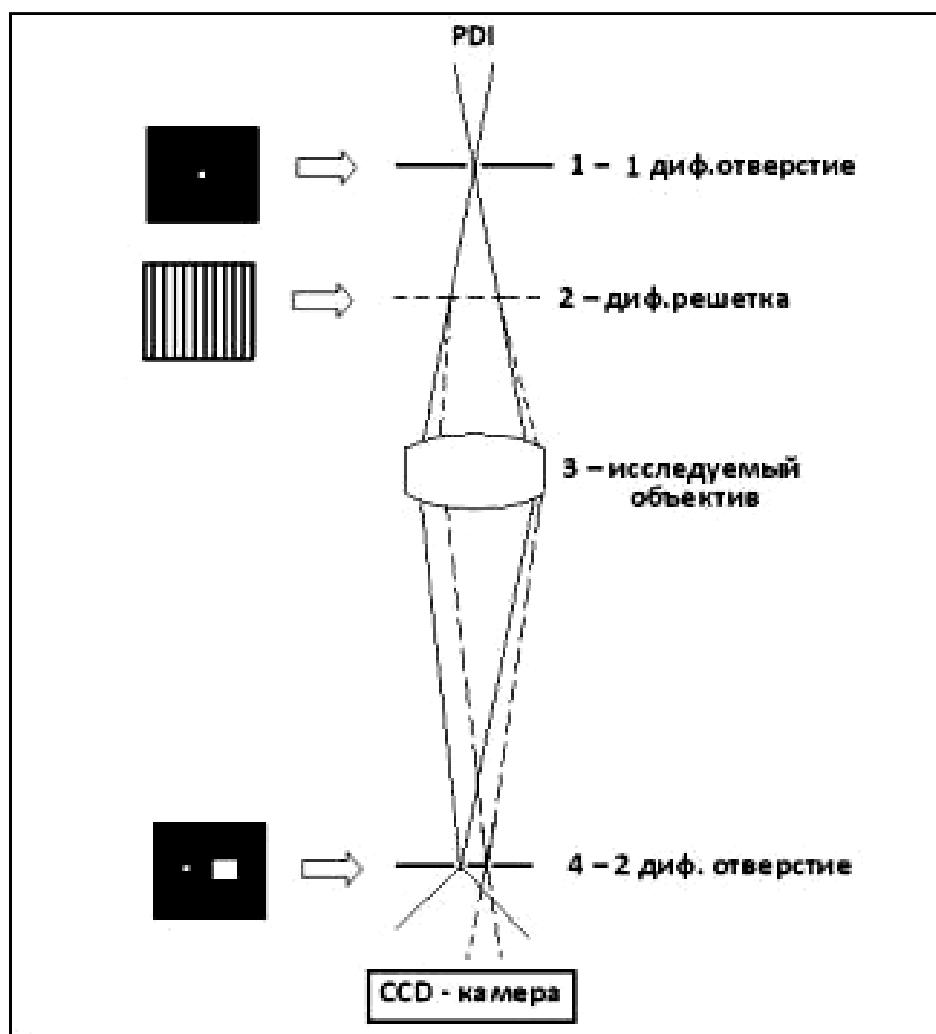


Рис. 51. Дифракционное отверстие, куда фокусируется центральный максимум пятна рассеяния, формирует идеальный волновой фронт

Волновой фронт концентрируется в плоскости изображения. В плоскости изображения установлена диафрагма, имеющая дифракционное отверстие, куда фокусируется центральный максимум, что формирует идеальный волновой фронт и, соответственно, окно предназначенное для прохождения 1 максимума, представляющего аберрированный волновой фронт объектива. Тогда, в результате суперпозиции двух волновых фронтов образуется интерференционная картина, подобная интерференционной картине Ронки. Интерференционная картина регистрируется цифровой камерой.

Расстояние между точечным отверстием и окном (диаметр описанной окружности) зависит от расстояния между двумя последовательными порядками, порожденными дифракцией и удовлетворяет выражению: $3d - \delta > D_f > d + \delta$, где D_f – ширина диафрагмы; δ – диаметр изображения. Кроме того, величина d должна быть достаточно большой так, чтобы две последовательные точки изображения не складывались. На рисунке 52 показана процедура выделения двух максимумов и интерференционная картина объектива микроскопа, полученная при моделировании такой схемы. Преимущество такой схемы контроля это возможность получения оперативной

информации о качестве волнового фронта исследуемого объектива при его доводке, так как конструктивное исполнение такого интерферометра достаточно простое и он может устанавливаться на место ножа Фуко.

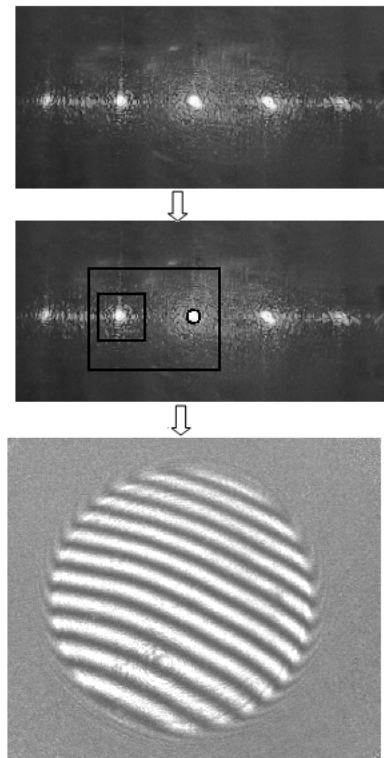


Рис. 52. Выделение двух дифракционных порядков и сформированная интерференционная картина

Итак, интерферометрический контроль позволяет, измерив карту деформации волнового фронта в выходном зрачке исследуемого объектива, рассчитать структуру и характеристики качества изображения объекта и определить пороговое разрешение.

Для исследования объективов предназначенных для формирования наноструктур необходим интерферометр с погрешностью волнового фронта лучше, чем $\lambda_k = 0.001$. Указанная чувствительность достигается при использовании интерферометров, в которых опорный волновой фронт формируется путем дифракции светового пучка, сфокусированного на малом точечном отверстии диаметром 2-3 λ (PDI - интерферометры). Интерферометр данного типа может быть использован как при контроле исследуемого объектива и его элементов, так и для контроля ошибок изготовления образцовых оптических деталей в интерферометрах классического типа (схемы Тваймана или Физо).

КОНТРОЛЬ ВОГНУТОГО ЗЕРКАЛА

Второе, вогнутое, зеркало проекционного объектива нанолитографа описывается следующим уравнением:

$$z^2(y) = 860.9328z - 1.107974z^2 - 0.864717E-04z^3,$$

профиль асферической поверхности представлен в таблице 9, рассчитанной в САПР “ОПАЛ”, где положительное значение деформации поверхности соответствует снятию материала. Максимальное отклонение от ближайшей сферы составляет 5.92 мкм.

Таблица 9. Профиль асферической поверхности

N	Профиль поверхности		Отклонение от сферы (мм)		
	Y(мм)	Z(мм)	параксиальной R0= -430.46640	ближайшей 1 R= -429.49006	ближайшей 2 R= -429.49599
1	43.200000	-2.173778	-.000594	.000000	-.005926
2	44.642000	-2.321763	-.000677	.000254	-.005672
3	46.084000	-2.474667	-.000770	.000511	-.005415
4	47.526000	-2.632494	-.000871	.000770	-.005156
5	48.968000	-2.795252	-.000982	.001030	-.004896
6	50.410000	-2.962946	-.001104	.001291	-.004635
7	51.852000	-3.135583	-.001236	.001552	-.004374
8	53.294000	-3.313169	-.001380	.001813	-.004113
9	54.736000	-3.495712	-.001537	.002073	-.003853
10	56.178000	-3.683218	-.001706	.002331	-.003594
11	57.620000	-3.875694	-.001890	.002587	-.003339
12	59.062000	-4.073149	-.002087	.002840	-.003086
13	60.504000	-4.275590	-.002301	.003089	-.002837
14	61.946000	-4.483024	-.002530	.003333	-.002593
15	63.388000	-4.695460	-.002775	.003571	-.002355
16	64.830000	-4.912906	-.003039	.003804	-.002122
17	66.272000	-5.135371	-.003321	.004029	-.001897
18	67.714000	-5.362863	-.003622	.004246	-.001680
19	69.156000	-5.595392	-.003944	.004455	-.001471
20	70.598000	-5.832966	-.004287	.004654	-.001272
21	72.040000	-6.075596	-.004652	.004842	-.001084
22	73.482000	-6.323290	-.005040	.005019	-.000907
23	74.924000	-6.576058	-.005452	.005183	-.000743
24	76.366000	-6.833911	-.005889	.005333	-.000592
25	77.808000	-7.096860	-.006352	.005470	-.000456
26	79.250000	-7.364914	-.006843	.005590	-.000336
27	80.692000	-7.638084	-.007362	.005694	-.000232
28	82.134000	-7.916382	-.007909	.005780	-.000146
29	83.576000	-8.199818	-.008488	.005848	-.000078
30	85.018000	-8.488405	-.009098	.005895	-.000031
31	86.460000	-8.782154	-.009741	.005922	-.000004
32	87.902000	-9.081076	-.010418	.005926	.000000
33	89.344000	-9.385186	-.011130	.005907	-.000019
34	90.786000	-9.694494	-.011878	.005862	-.000063
35	92.228000	-10.009013	-.012665	.005792	-.000133

36	93.670000	-10.328758	-.013490	.005695	-.000231
37	95.112000	-10.653740	-.014356	.005569	-.000357
38	96.554000	-10.983975	-.015264	.005413	-.000512
39	97.996000	-11.319474	-.016215	.005226	-.000699
40	99.438000	-11.660254	-.017211	.005007	-.000919
41	100.880000	-12.006327	-.018253	.004753	-.001173
42	102.322000	-12.357709	-.019342	.004463	-.001463
43	103.764000	-12.714414	-.020481	.004137	-.001789
44	105.206000	-13.076459	-.021670	.003771	-.002155
45	106.648000	-13.443858	-.022911	.003366	-.002560
46	108.090000	-13.816627	-.024207	.002919	-.003007
47	109.532000	-14.194783	-.025557	.002428	-.003497
48	110.974000	-14.578341	-.026965	.001893	-.004033
49	112.416000	-14.967319	-.028432	.001311	-.004615
50	113.858000	-15.361734	-.029960	.000681	-.005245
51	115.300000	-15.761602	-.031550	.000000	-.005926

Самая простая схема контроля данной поверхности, а именно из центра кривизны ближайшей сферы (рис.53) не может быть реализована, так как данная схема имеет очень большие aberrации. При моделирование схемы контроля были получены следующие коэффициенты разложения Цернике на длине волны $\lambda = 0.6328$ (табл.10)

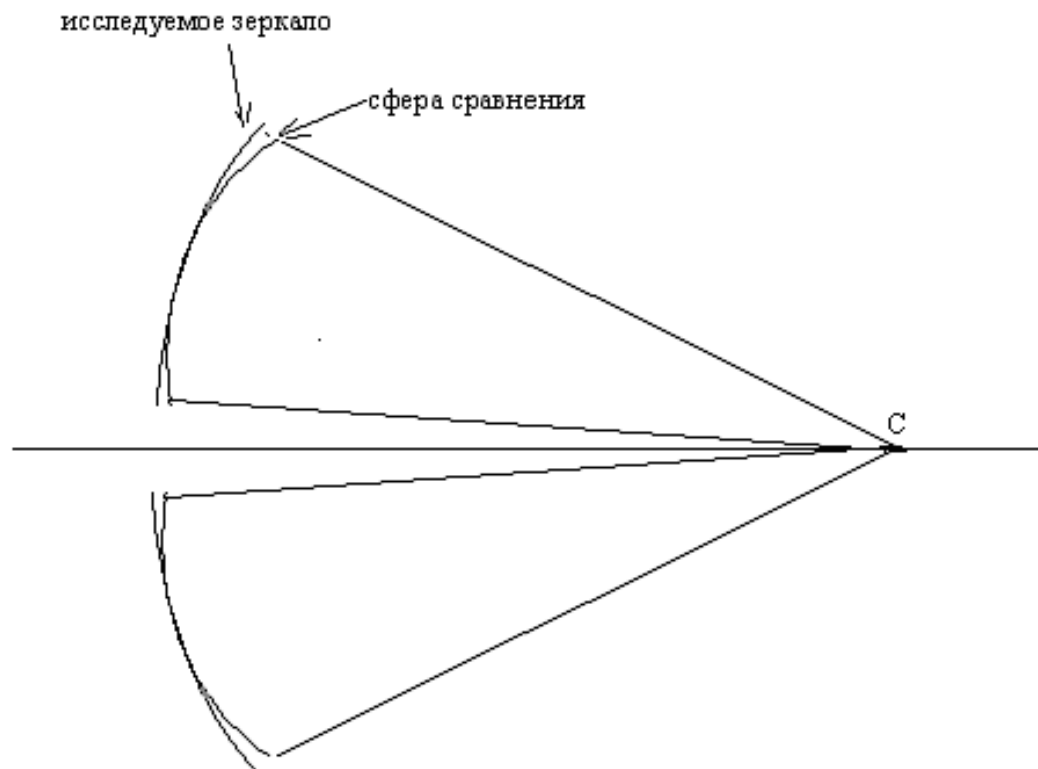


Рис. 53 Схема контроля из центра кривизны

Таблица 10. Коэффициенты разложения Цернике

коэффициент	Значение, λ
x 20	0.00126
x 40	16.7471
x 60	0.2691
x 80	0.0034
x 100	0

Максимальное значение волновой аберрации будет $16.7471 \times 0.6328 = 11$ мкм, тогда должно быть $11/0.6328=17.38$ полос на интерферограмме. Но, как видно из рис.1 волновой фронт, выходящий из интерферометра имеет нулевое отступление от поверхности исследуемого зеркала только в двух точках, тогда на интерференционной картине будет не 17.38 полос, а $17.38 \times 4 = 69.52$ полосы. Что подтверждает интерференционная картина (рис.54), полученная в результате моделирования в программе Zebra. Расшифровка такого вида интерферограмм, существующими методами, невозможна.

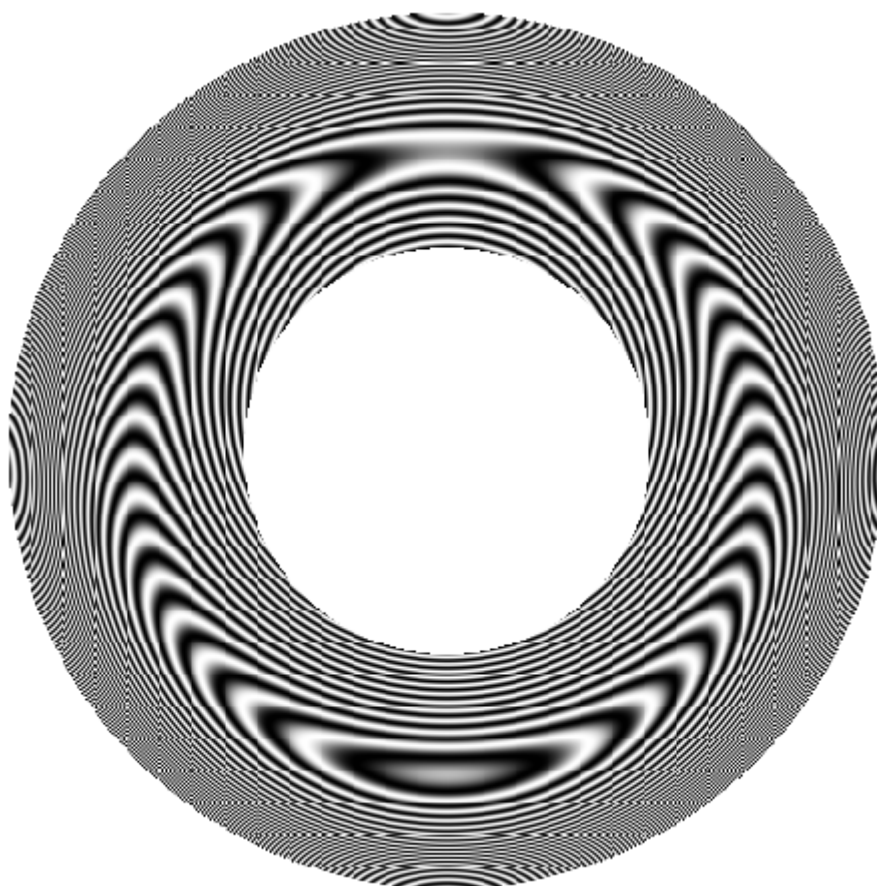


Рис. 54. Моделирование интерферограммы в программе “Zebra”

В соответствии с вышеизложенным контроль поверхности должен осуществляться в 4 этапа:

1. Доведение сферической поверхности под дифракционный интерферометр до качества $\Delta W_{rms} < 0.1\lambda$
2. Асферизация поверхности до 1 мкм
3. Асферизация поверхности до 5 мкм
4. Асферизация поверхности до 6 мкм

Сферическая абберрация требуемой поверхности из центра кривизны сферического зеркала составляет 11 мкм, т.е. сферическая абберрация при асферизации в 1 мкм будет составлять 1.9 мкм, что составляет 3 длины волны.

Интерферограмма соответствующая асферизации в 1 мкм приведена на рисунке 55 .

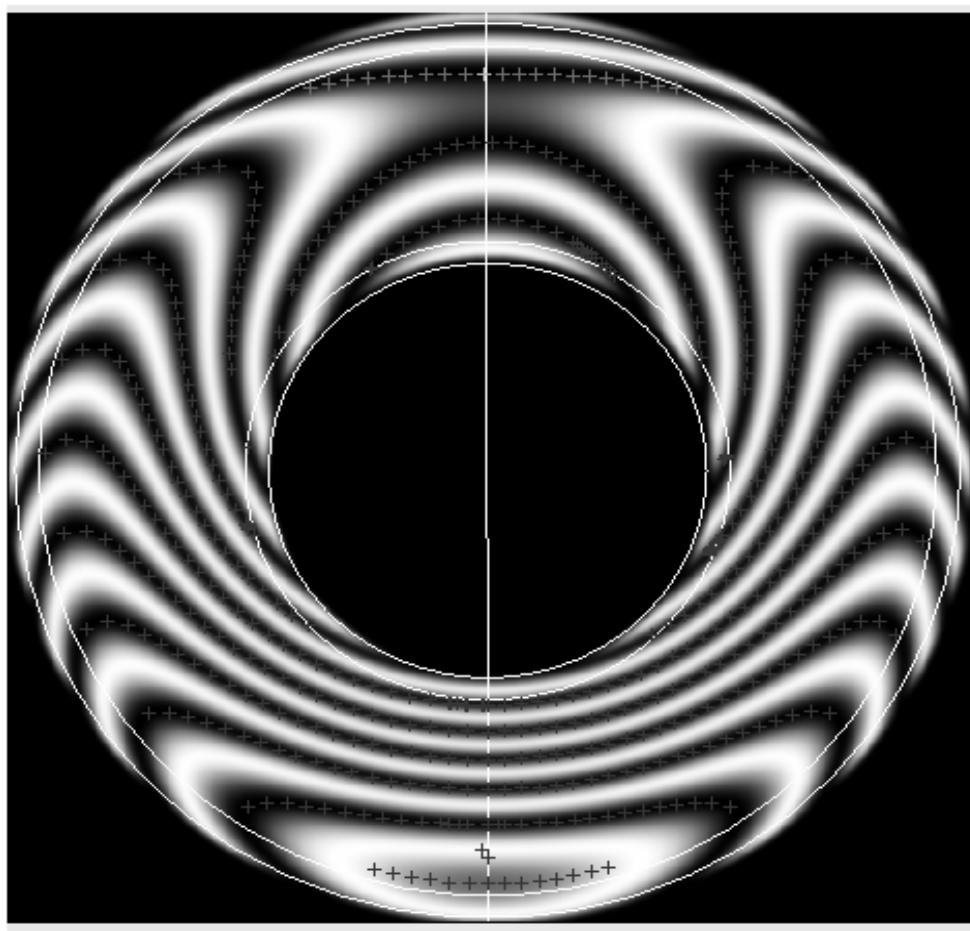


Рис. 55 . Асферизация в 1 мкм

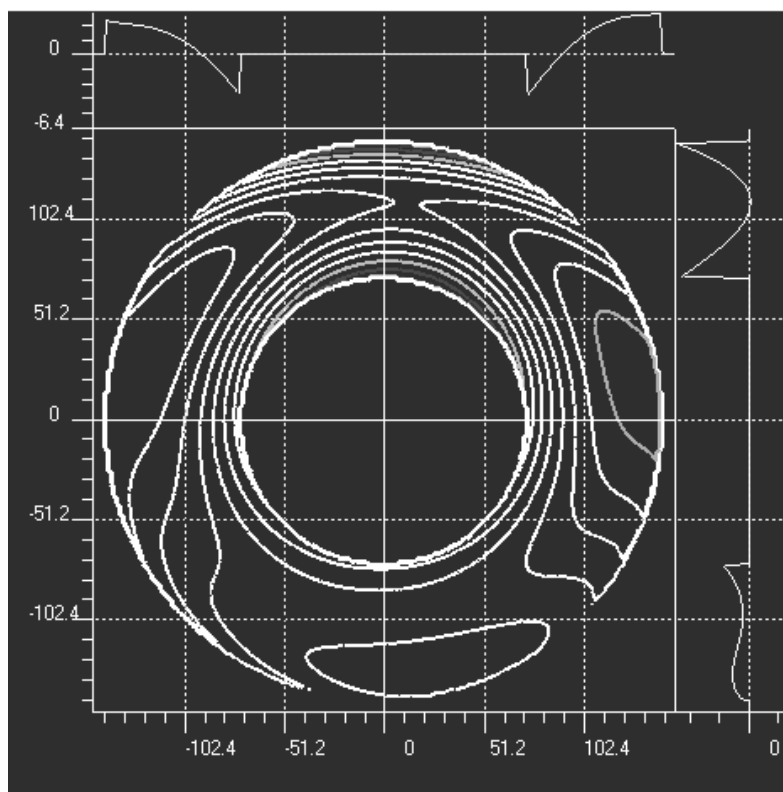


Рис.56. Карта волновых aberrаций

Карта волновых aberrаций может быть представлена в графическом режиме (рис.56) .

Асферизация до 5 мкм осуществляется при помощи компенсатора 1. Остаточная сферическая aberrация при асферизации до 5 мкм составляет так же 3 длины волны и соответственно интерферограмма такой же вид, как и при асферизации в 1 мкм.

Для окончательной асферизации используется компенсатор). При использовании данного компенсатора полностью компенсируется сферическая aberrация 3 – го порядка исследуемого зеркала и интерферограмма поверхности будет иметь следующий вид (рис.57).

Обработка поверхности зеркала может вестись под данные интерферограммы или под систему прямых полос, при условии занесения данных интерферограмм в память программы обработки.

Основной характеристикой объектива является частотно – контрастная характеристика (ЧКХ). Указанная характеристика может быть получена из анализа интерферограмм, в то же время получение ЧКХ способом, в основе которого лежит абсолютно другой физический принцип - исследование прямым методом реальной структуры изображения, даваемого исследуемым объективом, позволяет повысить достоверность результатов контроля.



Рис.57. При использовании компенсатора полностью компенсируется сферическая aberrация 3 – го порядка исследуемого зеркала

Такую задачу можно решить путем применения метода компьютерной изофотометрии.

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА НА ОСНОВЕ СЛОЖНОЙ АСФЕРИКИ

Ключевым моментом, обеспечивающим непрерывное развитие микроэлектроники, является возможность непрерывно уменьшать минимальные размеры элементов интегральных микросхем $a_{\min}$. До последнего времени прогресс здесь обеспечивался некоторыми усовершенствованиями фотолитографических процессов, использующих различные части видимого, ультрафиолетового и ближнего вакуумного – ультрафиолетового диапазонов электромагнитного излучения. На сегодняшний день таким способом достигнуто субмикронное разрешение, характеризуемое $a_{\min} = 65$ нм [25].

Основным технологическим решением получения такого размера элемента является идея использования иммерсии при работе обычного ArF эксимерного лазера на $\lambda = 193$ нм что существенно расширяет возможности традиционной технологии фотолитографии.

Но, дальнейшее уменьшение волны наталкивается на проблемы связанные с углублением в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) диапазон. Они

связаны в частности с отсутствием в природе оптически прозрачных материалов, пригодных для построения оптических систем и подложек для фотошаблонов.

Все это делает чрезвычайно актуальным поиск новых технологических решений обеспечивающих необходимый прогресс в литографии и обращает внимание к волновым процессам в экстремально ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне электромагнитного излучения ($50 < \lambda < 10$ нм). Основанием для этого являются наличие мощных источников излучения для ЭУФ литографии и разработка высокоотражающих ($R > 65\%$) многослойных покрытий для ЭУФ оптических элементов.

Оптическая система, работающая в ЭУФ диапазоне должна обладать следующими основными характеристиками:

1. размер минимального элемента формируемого системой должен быть $a_{\min} < 30$ нм
2. дисторсия оптической системы должна быть на уровне $0.1 \times a_{\min}$
3. иметь достаточно большое поле изображения.

Согласно критерию Релея величина минимального элемента, формируемого оптической системой прямо пропорциональна длине волны рабочего излучения.

$$a_{\min} = k\lambda / NA$$

k – технологический фактор, для ЭУФ диапазона он принимает значения $0.5 < k < 0.6$, λ – рабочая длина волны, $\lambda = 10 - 13.4$ нм, NA – числовая апертура объектива.

Понятно, что в оптических системах для ЭУФ – литографии возможно использование только отражательных поверхностей и в разрабатываемых оптических системах для ЭУФ – литографии стремятся уменьшить центральное экранирование или по возможности избежать его. Но, системы с центральным экранированием обладают существенно большей числовой апертурой ($NA > 0.4$) при малом поле экспонирования (0.5×0.3 мм) при достаточно простой конструкции объектива, чем нецентрированные системы без центрального экранирования с меньшей апертурой ($NA < 0.4$), но большим полем (2×30 мм).

С начала 1990 г. в мире основным объективом для проведения экспериментальных исследований выбран объектив, построенный по схеме Шварцшильда. Большая часть такого рода объективов была разработана в период с 1996 – 1999 г. Все они отличаются друг от друга числовой апертурой $NA = 0.06 \div 0.3$. Первая система имела кольцевое поле (0.05×25 мм) и числовой апертурой $NA = 0.1$; вторая система имела прямоугольное поле 0.5×0.3 мм и числовой апертурой $NA = 0.3$. Указанные оптические системы предназначены для использования в экспериментальных установках для получения минимального элемента $a_{\min} = 30 - 65$ нм.

Достижение такого высокого разрешения возможно только при использовании асферических поверхностей. Требования к профилю и качеству асферической поверхности, а соответственно и для суммарного качества ЭУФ – систем находятся на уровне тысячных долей длины волны и поиск новых схем

контроля или модернизация классических схем представляют собой актуальную задачу.

Анализ влияния точности профиля асферической поверхности

Рассматривается объектив со следующими характеристиками:

- рабочая длина волны – 0.0134 мкм
- числовая апертура $NA' = 0.36$
- экранирование - 0.36
- размер поля изображения - 0.82 x 0.82 мм²
- увеличение – -10^x
- СКВ по полю изображения – 0.01 – 0.107
- глубина фокуса для края поля изображения - ± 15 нм
- глубина фокуса для центра поля изображения - ± 50 нм

На рис. 58 показан рассчитанный объектив. В таблице 11 показаны коэффициенты зонального разложения полиномов Цернике по полю для рассматриваемого объектива.



Рис. 58. Объектив ILPH – 1;

1- маска, 2 - выпуклое зеркало (вторичное), вогнутое зеркало (главное), 4 – плоскость изображения.

Рассмотрим влияние изменения параметров оптической системы на качество оптического изображения. Программное обеспечение (ОПАЛ, ZEMAX, CODE V и т.д.) может вычислить влияние различных приращений параметров на отклонение отделенных лучей или отклонения выбранного критерия качества. Введение приращений параметров изменяет увеличение оптической системы, но в реальной практике, увеличение восстанавливается за счет изменения расстояния от объекта до объектива (передний отрезок), эта операция автоматически выполняется программным обеспечением, поэтому считаем, что увеличение оптической системы остается постоянным.

Уравнение, описывающее зеркала оптической системы имеет следующий вид: $y^2(z) = 2R_0 z + (e^2 - 1)z^2 + A_3 z^3 + \dots + A_n z^n$, где R_0 – радиус кривизны при вершине, e^2 – эксцентриситет поверхности, $A_3 \dots A_n$ – коэффициенты высшего разложения.

Рассмотрим влияние отклонения геометрического профиля асферических поверхностей на изменение СКО волнового фронта. Выберем такое приращение коэффициентов уравнения, при котором СКО оптической системы изменяется на 15 % для каждой точки поля.

Коэффициенты зонального разложения для $\lambda = 0.0134$ мкм.

Таблица 11

Y = 5.8 мм					
расфокусировка	сферическая аберрация				
cwz 20	cwz 40	cwz 60	cwz 80	cwz 100	cwz 120
-0.0283	0.0007	0.0021	-0.0297	-0.0013	0.0000
дисторсия	кома				
cwz 11	cwz 31	cwz 51	cwz 71	cwz 91	cwz 111
0.0005	0.0028	-0.0048	-0.0053	-0.0002	0.0000
астигматизм					
cwz 22	cwz 42	cwz 62	cwz 82	cwz 102	
0.2852	0.0075	0.0013	0.0009	0.0000	
Y = 2.9					
расфокусировка	сферическая аберрация				
cwz 20	cwz 40	cwz 60	cwz 80	cwz 100	cwz 120
0.0126	0.001	0.0013	-0.0302	-0.0013	0.0000
дисторсия	Кома				
cwz 11	cwz 31	cwz 51	cwz 71	cwz 91	cwz 111
0.0017	0.0016	-0.0021	-0.0021	-0.0001	0.0000
астигматизм					
cwz 22	cwz 42	cwz 62	cwz 82	cwz 102	
0.0715	0.0020	0.0004	0.0002	0.0000	
Y=0.0					
расфокусировка	сферическая аберрация				
cwz 20	cwz 40	cwz 60	cwz 80	cwz 100	cwz 120
0.0261	0.001	0.0009	-0.0304	-0.0013	0.0000

Исходя из анализа влияния изменения геометрического профиля поверхности зеркал, можно сделать вывод о том, что изготовление компонентов и юстировка такой оптической системы может быть основана на следующих принципах:

- качество оптической системы должно оцениваться **единственным** критерием, включающим в себя также и дисторсию,
- Все ошибки изготовления элементов и сборки такой системы должны быть описаны **статистически независимыми параметрами**,
- Должны быть рассчитаны матрицы, содержащие приращения всех функций при изменении всех параметров оптической системы при приращениях

равных **реальным допускам** на производство того или иного компонента оптической системы,

- Критерий качества изготовления элементов объектива должен описываться строго в соответствии с условиями производства,
- Должны быть определены методы измерения полного качества оптической системы и отдельных компонентов с необходимой точностью,
- Должны быть определены методы контроля для промежуточных технологических операций, коррелирующих с основным методом полной оценки качества оптической системы,
- Конструкция объектива должна учитывать возможность юстировки элементов объектива с необходимой точностью, с учетом их реального качества.

Методы и средства контроля элементов объектива

Рассмотрим методы и средства контроля главного зеркала рассматриваемого объектива, позволяющих получить высокое качество поверхности при контроле элементов объектива на длине волны $\lambda_k = 0.633$ мкм. Выбор такой длины волны в качестве контрольной определяется тем, что контроль на данной длине волны наиболее полно обеспечен программными и технологическими комплексами. Основные методы и средства контроля:

- априорное моделирование интерферограмм на разных этапах асферизации,
- принципы вычитания волновых фронтов для коррекции технологического процесса,
- использование в качестве средства полного измерения качества оптической системы – дифракционного интерферометра, имеющего теоретическую ошибку волнового фронта $\lambda_k/1000$.

Общепринятым технологическим процессом изготовления двухзеркальных объективов является то, что вторичное (малое) зеркало изготавливается под реально изготовленное главное зеркало в режиме автоколлимации. Этим упрощается технический процесс в том плане, что ошибки изготовления главного зеркала компенсируются изготовлением второго зеркала.

Для реализации режима автоколлимации, требуется технологическое аллюминирование вторичного зеркала для осуществления сеансов контроля. К сожалению, использование технологического аллюминирования невозможно в случае изготовления оптических компонентов для ЭУФ – систем, так как требования к шероховатости поверхности находится на уровне 3-5 нм.

Исходя из вышесказанного, интерферометры, работающие в режиме автоколлимации, не могут использоваться для решения задачи изготовления вторичного зеркала в сборе с главным зеркалом, соответственно необходим такой интерферометр, который работает в проходящем свете.

Можно назвать два пути решения указанной задачи – это использования интерферометра Линника или использования интерферометра сдвига.

Интерферометр сдвига

а) Устройства

Наряду с классическими интерферометрами, построенными по принципу деления амплитуды световой волны и создания рабочего и опорного волновых фронтов, создаются интерферометры, основанные на принципе сдвига раздвоенного по амплитуде рабочего волнового фронта, известные как интерферометры сдвига. Особенность такого интерферометра заключается в том, что он не требует применения образцового волнового фронта и эталонных оптических деталей, так как в нем контролируемый волновой фронт накладывается на точно такой же, но сдвинутый (чаще всего – в поперечном направлении), что создает разность фаз, указывающих на деформации исследуемого волнового фронта. Интерферометры сдвига мало чувствительны к вибрациям, так как интерферирующие лучи проходят один и тот же путь. Основным недостатком интерферометров сдвига являлась меньшая наглядность и сравнительная сложность расшифровки интерференционной картины при количественной оценке погрешностей исследуемой системы, особенно при определении поверхности деформаций волнового фронта. Покажем принцип работы интерферометра сдвига. Пусть в исследуемую оптическую систему 6 (рис. 59), например объектив, падает плоский волновой фронт, который преобразуется в сферический волновой фронт, в общем случае искаженный аберрациями и ошибками изготовления объектива. Кубик 7 с полупрозрачной гипотенузной гранью делит пучок лучей на два и направляет полученные пучки к плоским зеркалам 8 и 9; каждый пучок фокусируется на поверхности плоского зеркала. Таким образом, задний фокус исследуемой системы совмещен с плоскостью зеркал 8 и 9. Пучки лучей, отраженные от зеркал 8 и 9, возвращаются в автоколлимации на светоделительный кубик 7 и заполняют входной зрачок объектива 10, интерферируя между собой.

Изображение зрачка исследуемого объектива 6 с заполняющей его картиной полос интерферометрии сдвига, формируется объективом регистрирующей камеры 10 на поверхности матрицы 11. Картина интерференционных полос зависит как от деформаций исследуемого волнового фронта, так и от настройки интерферометра. Если зеркала 8 и 9 расположены на равных расстояниях от выходных граней кубика 7, то поворотом одного из них можно получить интерференционную картину бокового сдвига.

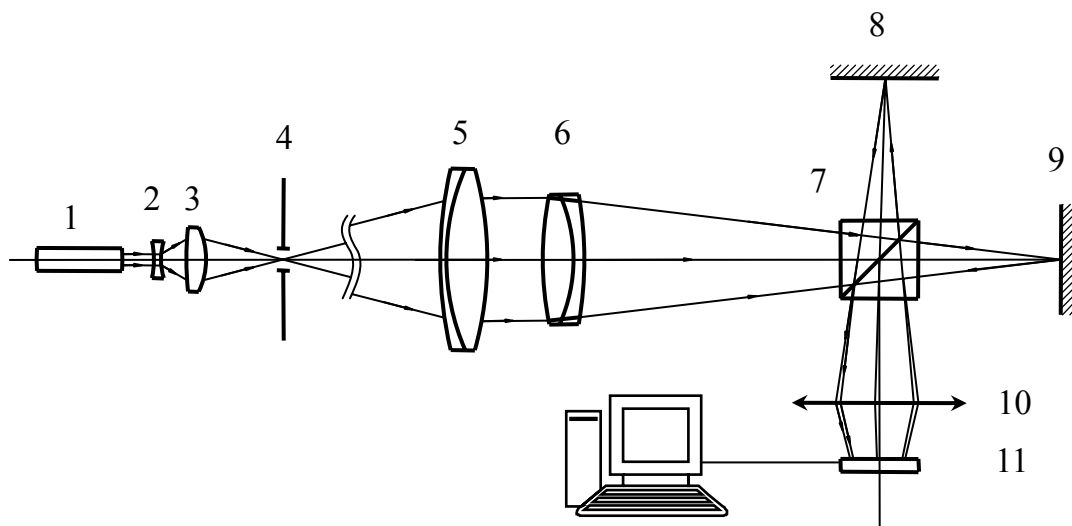


Рис.59. Схема интерферометра бокового сдвига

1 – лазер; 2 и 3 – осветительный объектив; 4 – точечная диафрагма;
5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемый объектив; 7 – светоделительный кубик; 8 и 9 – плоские автоколлимационные зеркала; 10 – объектив регистрирующей камеры; 11 – матрица регистрирующей камеры

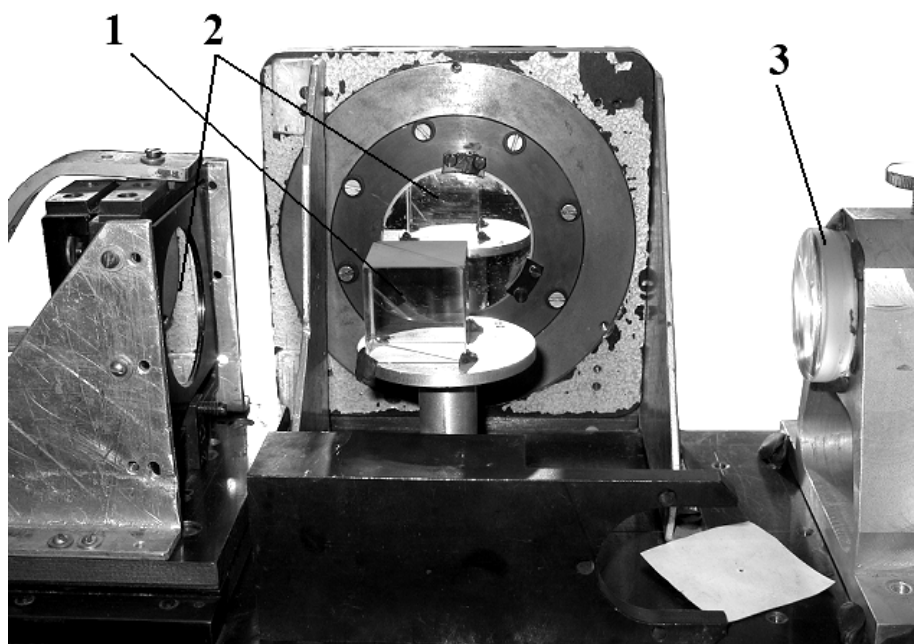


Рис.60 . Общий вид интерферометр сдвига

1 - светоделительный кубик; 2 – зеркала; 3 – исследуемой объектив

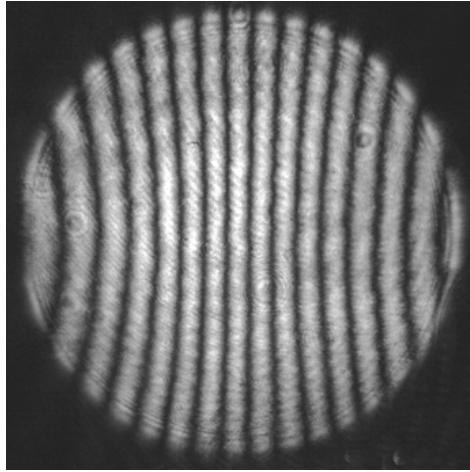


Рис.61. Экспериментальная интерферограмма сдвига

Математическое описание интерферометра бокового сдвига

На рис.62 показаны исходный волновой фронт и его аналог с боковым сдвигом. Будем считать исходный фронт практически сферическим, с небольшими отклонениями $W(x, y)$ (где x, y – координаты произвольной точки P) от сферы. При смещении фронта на величину s в направлении x его погрешность в точке P составит $W(x-s, y)$, а результирующая разность хода ΔW для двух фронтов определится как $[W(x, y) - W(x-s, y)]$. Вид интерференционной картины определяется разностью хода между двумя волновыми фронтами, т. е. функцией $\Delta W(x, y)$. Интенсивность в произвольной точке в интерференционной картины выражает формула

$$I(x, y) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{\Delta W(x, y)}{\lambda} \right) \right], \quad (28)$$

где I_0 - интенсивность каждой из световых волн,
 $\Delta W(x, y)$ - разность хода,
 λ - длина волны излучения.

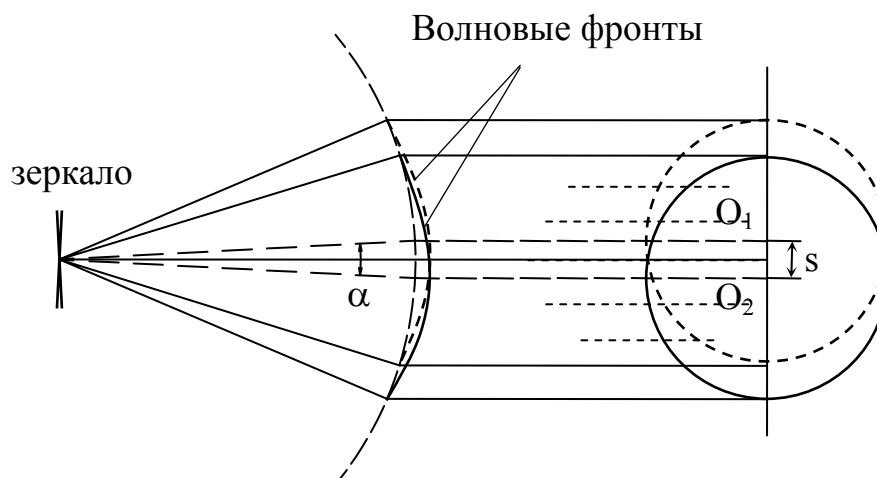


Рис. 62. Принцип появления интерференционных полос

Интерференционная картина представляет собой топографию этой функции. Из (1) получаем уравнения для интерференционных полос

$$\Delta W(x, y) = W(x, y) - W(x - s, y) = N\lambda, \quad (29)$$

где x, y – координаты на зрачке испытываемой системы,
 N – порядок полосы – целое число.

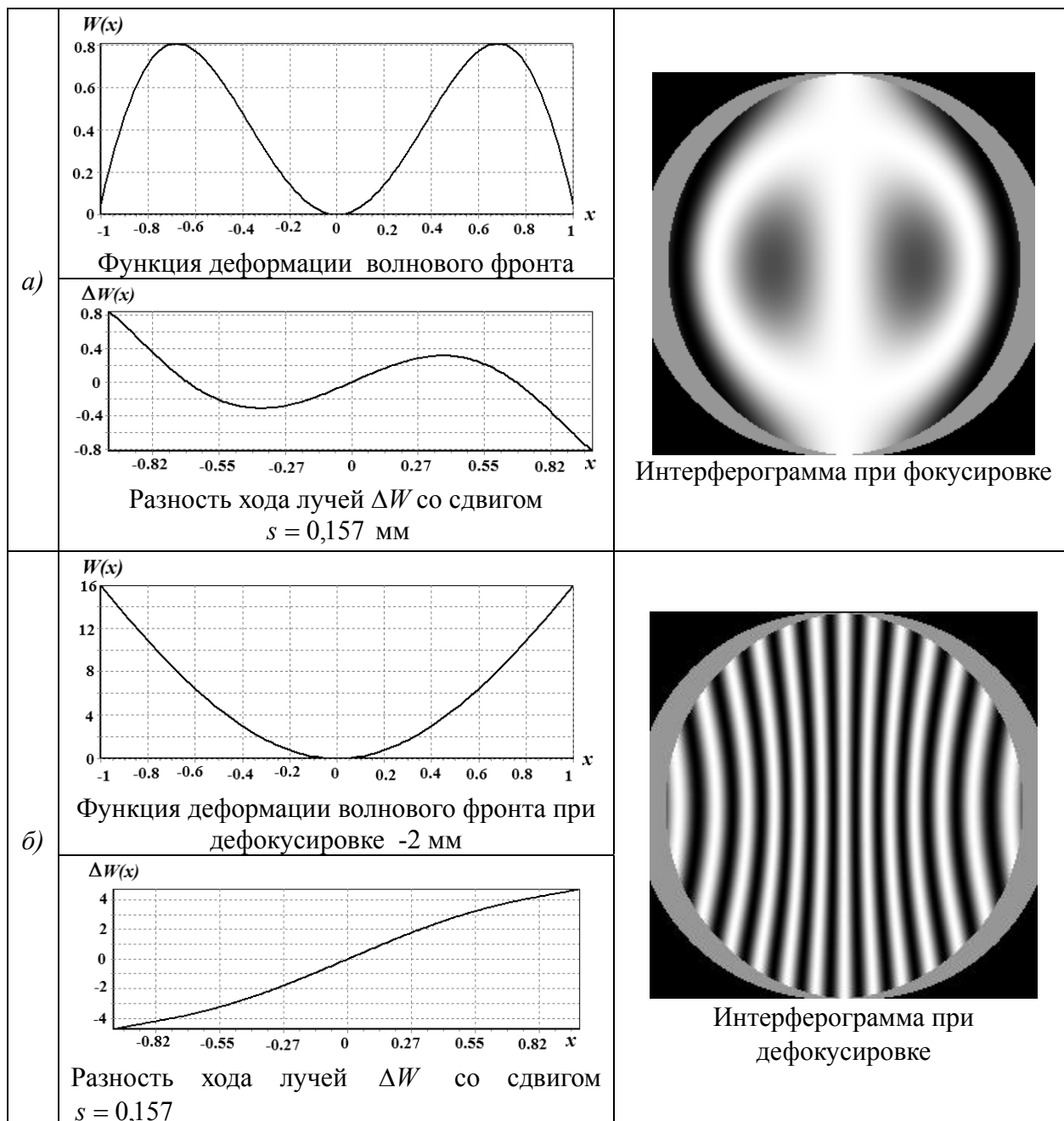


Рис. 63. Интерферограмма бокового сдвига для объектива

а) в случае присутствия только сферической аберрации без поперечной дефокусировки;

б) в случае присутствия только сферической аберрации и введения дефокусировки -2 мм

Интересно отметить, что при малых значениях s уравнение (5.2) можно записать в виде

$$\frac{\partial W}{\partial x} s = N\lambda. \quad (30)$$

Следовательно интерферометр бокового сдвига дает информацию об аберрации $\partial W / \partial x$ луча в угловых единицах. Уравнение становится более корректным при

$s \rightarrow 0$, однако одновременно снижается и чувствительность; поэтому, исходя из требуемой в каждом конкретном случае точности, необходимо находить оптимальное значение s .

Пользуясь формулой (29) можно вычислить интерферограмму по заданному волновому фронту, и наоборот, по интерферограмме можно восстановить испытуемый волновой фронт (качественно и количественно оценить погрешности исследуемой оптической системы). Для этого созданы алгоритмы и программное обеспечение [26], которые позволяют моделировать интерферограмму оптической системы по конструктивным параметрам системы, отображая влияние расчетных aberrаций. Программа позволяет также восстанавливать волновой фронт в ходе контроля оптической системы и ее элементов в процессе производства.

Процесс компьютерного моделирования показал, что при небольшом сдвиге и отсутствии поперечной расфокусировки интерферометра (то есть взаимного заклона наложенных волновых фронтов) количество интерференционных полос очень мало. Поэтому, для получения системы полос удобных для расшифровки необходимо сдвиг дополнить небольшой поперечной расфокусировкой, чтобы полосы стали чаще (рис. 63 б).

Здесь под расфокусировкой интерферометра понимается поперечное разведение автоколлимационных бликов, приводящее к появлению взаимного наклона двух интерферирующих волновых фронтов.

Кроме того, ввод поперечной расфокусировки позволяет устранить неопределенность при расшифровке сложных волновых фронтов, позволяя избежать появления интерференционных полос замкнутой формы.

При математической обработке результатов интерферометрии введенная технологическая расфокусировка устраняется программой в процессе балансирования системы коэффициентов Цернике.

Восстановление волнового фронта при обработке интерферограммы сдвига

Задача количественной оценки погрешности оптических систем по интерферограмме сдвига сложнее, чем задача обработки классических интерферограмм Тваймана – Грина или Физо, и в полном объеме может быть решена только благодаря эффективным алгоритмам.

Как известно, для восстановления двумерной функции деформаций волнового фронта $W(x, y)$ необходимо и достаточно знать первые производные этих деформаций по двум взаимно-перпендикулярным направлениям x и y . После этого программа [26] находит функцию $W(x, y)$ путем решения системы дифференциальных уравнений. В этом случае две первые производные волнового фронта можно определить из двух интерферограмм, полученных при сдвиге по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Далее применен указанный принцип.

Из формулы (29) следует, что если сдвиг происходит поочередно по двум направлениям, перпендикулярным друг к другу (x и y), то получаются две интерферограммы с полосами, которые описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W}{\partial x} s &= \lambda N, \\ \frac{\partial W}{\partial y} s &= \lambda N.\end{aligned}$$

Совокупный результат определяется системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\lambda N}{s} \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\lambda N}{s} \end{cases} \quad (31)$$

Из системы (5.4) видно что, все точки, находящиеся на одной полосе, отображают первую производную волнового фронта со значением $\lambda N/s$ в заданном направлении x и y .

Поэтому при обработке двух интерферограмм получаем совокупность точек, принадлежащих функциям $\partial W/\partial x$ и $\partial W/\partial y$. Эти функции можно описать полиномами Цернике $P_x(x,y)$ и $P_y(x,y)$ методом наименьших квадратов. В результате имеем:

$$\begin{cases} \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = P_x(x,y) \\ \frac{\partial W(x,y)}{\partial y} = P_y(x,y) \end{cases} \quad (32)$$

Данные уравнения являются системой дифференциальных уравнений. Решение этой системы дает функцию полной поверхности деформаций волнового фронта $W(x,y)$.

После получения функции деформаций в численном виде, нужно представить ее с помощью полинома Цернике с коэффициентом C_{20} для устранения поперечной расфокусировки.

На основе созданного математического аппарата и алгоритма в ходе данного исследования разработана программа “Tiger”, которая позволяет восстанавливать волновой фронт, обрабатывая две сдвиговые интерферограммы, полученные при сдвиге последовательно по двум взаимно перпендикулярным направлениям, и анализировать результаты для получения количественных характеристик качества изображения, например, таких, как функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ) или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

Анализ изображения объектива экспериментального нанолитографа при помощи метода компьютерной изофотометрии

До последнего времени прогресс развития микроэлектроники обеспечивался возможностью непрерывно уменьшать минимальные размеры элементов

интегральных микросхем благодаря усовершенствованиям фотолитографических процессов. На сегодняшний день таким способом достигнуто субмикронное разрешение.

Дальнейшее развитие требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) диапазон. Становится чрезвычайно актуальным поиск новых технологических решений. В их числе – зеркальные объективы, построенные по схеме Шварцшильда. В разделе рассмотрена методика контроля объектива на стадии финишной доводки, анализ прямым методом изофотометрии структуры изображения точки, сформированного объективом на различных технологических этапах, определение характеристик качества изображения системы.

Для формирования интерференционной картины обычно необходим режим автоколлимации, но такой режим контроля не может быть реализован для всего объектива в целом, так как в этом случае, как известно, в системах, построенных из поверхностей, не имеющих зеркального покрытия, не хватает света. Поэтому необходимо разрабатывать методы и схемы контроля объективов в режиме работы в проходящем свете.

Контроль вогнутого зеркала

Объектив обладает следующими расчетными характеристиками:

1. Рабочая длина волны – 13,4 нм.
2. Числовая апертура – 0,36.
3. Экранирование – 0,36.
4. Размер поля изображения – 0.82 x 0.82 мм.
5. Увеличение = -10.
6. Среднеквадратичное отклонение волнового фронта (СКВ) по полю изображения – $0,01\lambda \div 0,12\lambda$.
7. Глубина фокуса для крайней точки поля изображения = ± 15 нм.
8. Глубина фокуса для центральной точки поля изображения – ± 50 нм.

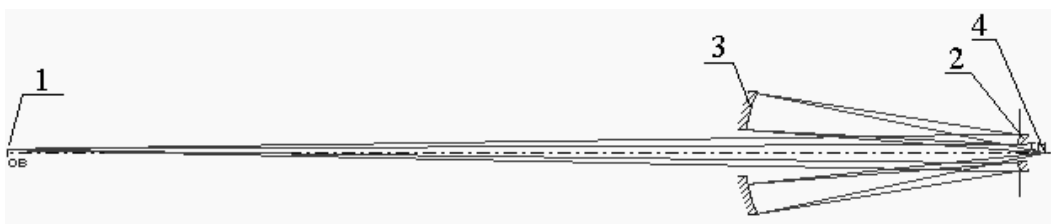


Рис.64. Объектив экспериментального нанолитографа

1-маска (объект), 2 - главное (малое) зеркало, 3 – вторичное зеркало, 4 – плоскость изображения

Уравнение, описывающее зеркала оптической системы, имеет следующий вид: $y^2(z) = 2R_0z + (e^2 - 1)z^2 + A_3z^3 + \dots + A_nz^n$, где R_0 - радиус кривизны при вершине, e^2 - квадрат эксцентриситет поверхности, $A_3 \dots A_n$ - коэффициенты разложения.

В табл. 11 показаны основные технологические характеристики асферических поверхностей, используемых в объективе.

Таблица 11. Технологические характеристики асферических поверхностей

Характеристика	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Асферичность	14,6 мкм.	16,5 мкм.
Градиент	0,06 мкм/мм	0,02 мкм/мм
Крутизна	7,5 град	18,63 град

Для реальных оптических систем волновая aberrация описывается через ортогональные коэффициенты разложения следующим образом:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n [R_n^m(\rho)(C_{nm} \cos m\varphi + S_{nm} \sin m\varphi)], \quad (33)$$

где C_{nm}, S_{nm} - косинусный и синусный коэффициенты разложения волновой aberrации. Если в системе отсутствуют децентрировки, то в этом случае $S_{nm} = 0$, тогда выражение 1 можно записать в следующем виде:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_m C_{nm} R_n^m(\rho) \cos m\varphi. \quad (34)$$

В табл. 12 показаны коэффициенты разложения волновой aberrации рассматриваемого объектива на рабочей длине волны $\lambda_p = 13.4$ нм для случая центрированной системы. При вычислении коэффициентов Цернике центральное экранирование не учитывалось, т.е. аппроксимация aberrаций была выполнена по полной апертуре.

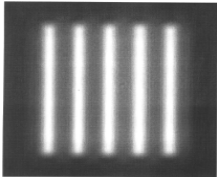
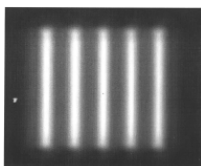
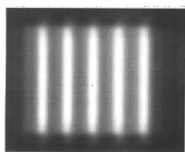
Таблица 12. Разложение волновой aberrации объектива по коэффициентам Цернике для $\lambda = 13.4$ нм

C_{nm}	Координаты на изображении		
	край поля	½ часть поля	центральная часть поля
20	-0.028	0.013	0.026
40	0.000	0.001	0.001
60	-0.002	0.013	0.001
11	-0.001	0.002	-
31	0.003	0.002	-
51	-0.005	-0.002	-
22	0.285	0.072	-
42	0.008	0.002	-

В табл. 13 показаны результаты моделирования разрешения объективом периодической структуры с шириной полос 30 нм на основе векторной теории дифракции, с учетом экранирования оптической системы для различных точек поля изображения.

Как видно из описания волнового фронта, aberrации центральной части поля настолько малы, что не критичны для качества изображения центральной части поля, («размытие» изображения определяется эффектом центрального экранирования), в отличие от периферийной части, где происходит заметное ухудшение качества изображения.

Таблица 13. Результаты моделирования периодической структуры ЭУФ – объективом на рабочей дине волны $\lambda = 13.4$ нм

центральная часть поля	$\frac{1}{2}$ радиуса поля	край поля
		
Контраст изображения 0.6	Контраст изображения 0.58	Контраст изображения 0.5

Стратегия изготовления объектива экспериментального нанолитографа

Точность изготовления асферической поверхности связана с выбранной технологией обработки и системой контроля, обеспечивающей возможность выявления ошибок детали, с последующим однозначным их описанием в любой момент времени для оперативной коррекции технологического процесса.

Один из основных способов изготовления сложных асферических элементов - использование компенсационной схемы контроля.

Основной недостаток компенсационной схемы контроля состоит в наличии возможной неоднозначности в процессе контроля поверхности в момент установки компенсатора в схему контроля, когда суммарная ошибка оптической системы «компенсатор + исследуемая деталь» очень велика и невозможно оценить ошибки поверхности никаким способом, кроме теневого, который в настоящее время используется как качественный, или при помощи интерферометра сдвига, точность которого, как известно, ограничена определением самой величины сдвига.

Поэтому в случае двухзеркальных оптических систем классической стратегией изготовления объектива является изготовление одного из зеркал объектива в компенсационной схеме контроля. Ошибки изготовления первого зеркала, полученные на этапе аттестации, вводятся в расчетную программу, например «ОПАЛ» или «Zemax», и путем пересчета формы поверхности второго зеркала достигается требуемое расчетное качество оптического

изображения. Далее, согласно новой форме второго зеркала вводятся изменения в технологический процесс. Контроль второго зеркала ведется в схеме объектива. В рассматриваемом здесь случае контроль изменения качества объектива необходимо вести по структуре изображения точки, формируемой оптической системой, и успешное изготовление объектива зависит от методов и средств контроля объектива по формируемой точке. Наиболее чувствительным и информативным методом, позволяющим в реальном масштабе времени измерять ФРТ прямым методом в диапазоне перепада интенсивности в $10^4 - 10^5$ крат, а далее корректно рассчитывать основные характеристики оптической системы (ЧКХ, ФРЛ, ФКЭ), является метод компьютерной изофотометрии [27].

Метод компьютерной изофотометрии

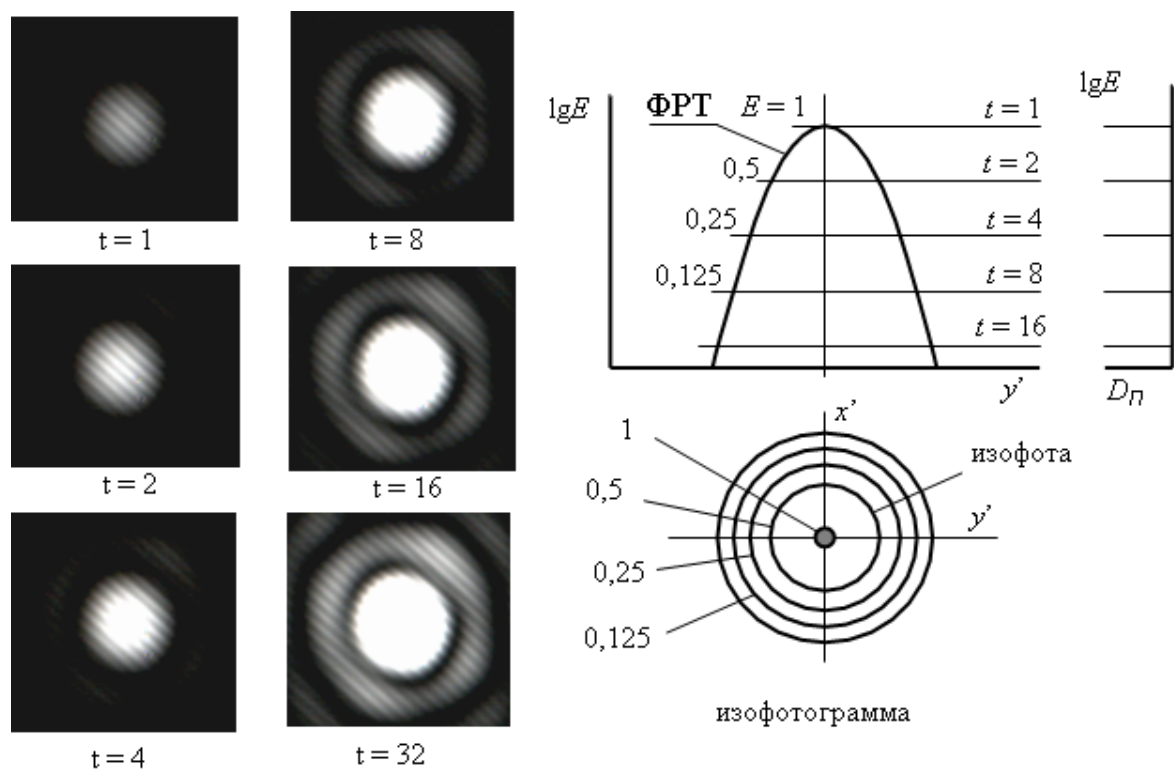


Рис.65. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотogramмы

Метод компьютерной изофотометрии основан на получении серии снимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции, и последующем получении путем оконтуривания, совокупности контуров фотометрических сечений, то есть системы изофот, соответствующих ряду различных уровней равной освещенности. Итак, каждое фотометрическое сечение формируется как фигура с четким контуром, и линия контура является изофотой, где изофота есть геометрическое место точек, имеющих равное значение уровня относительной освещенности, но различные пространственные координаты. Формирование изофоты исследуемого оптического изображения осуществляется благодаря применению приемника изображения, обладающего световой характеристикой (или функцией преобразования ФП) типа "импульс".

Для получения ФП такого вида выполняется регистрация данного оптического изображения в виде серии последовательных кадров при осуществлении ряда экспозиций различной длительности на приемник изображения с импульсной световой характеристикой (ФП типа "импульс") [28]. Удобно этот ряд экспозиций располагать по шкале длительностей, значения которых определяются степенным законом возрастания:

$$t_i = 2^i,$$

где t - относительная продолжительность экспозиции.

Равномерная шкала логарифмов экспозиции позволяет последовательно "наводиться" импульсной характеристической кривой на равномерный ряд фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону изменения интенсивности.

Таким образом, при использовании приемника изображения с импульсной функцией преобразования, изменяя время накопления на приемнике изображения, достигаем эффекта перемещения импульсной функции преобразования в новые положения вдоль оси $\lg E$.

Для построенного семейства характеристических кривых $D_n = f(\lg E)$ при $t = \text{const}$ каждой отдельной кривой соответствует соотношение из следующей серии:

$$E_1 = H/t_1; \quad E_2 = H/t_2; \dots \quad E_n = H/t_n$$

Нормируя полученный ряд освещенностей к значению максимальной освещенности в данном распределении, получим выражение в относительных (безразмерных) единицах:

$$E_{\text{отн}} = 1/t_{\text{отн}};$$

или, в логарифмической форме: $\lg E_{\text{отн}} = -\lg t_{\text{отн}}$.

При этом время удобно задавать в целых числах, а относительную освещенность - в долях от максимального значения, принятого за единицу. Последние две формулы являются основными выражениями структурометрического метода изофотометрической регистрации.

В современных условиях методы изофотометрии построены на использовании различных современных электронных приемников изображения, таких как телевизионные приемники, включая видеокамеры широкого назначения, а также цифровые фотографические камеры. Такие камеры способны изменять время накопления в широком диапазоне, что обеспечивает достижение перепада регистрируемой освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков. Тем самым, изображение светящейся точки, построенное исследуемой системой, многократно фиксируется на однотипный фотоприемник при различных длительностях экспозиции. Изофоты различных уровней, расположенные на отдельных снимках, после оконтуривания совмещают в топограмму распределения освещенности (изофотограмму).

Достоинства метода изофотометрии с переменным накоплением:

- 1) большой диапазон измерения перепада освещенностей в пятне рассеяния;

2) высокая светочувствительность; это особенно важно при недостатке световой энергии в схеме, например при контроле оптических поверхностей без зеркального покрытия.

К недостаткам этого метода прежде отнесли необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции; это требование, без применения компьютерных программ, приводило к снижению оперативности исследований.

На рис.66 показано алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением [26]. На основе этого алгоритма создан программный модуль, позволяющий определить ФРТ. В процессе работы модуля значения ФРТ определяются от максимальных к минимальным. Такой процесс называется изофотометрическим сканированием ФРТ.

В процессе измерения, после установки увеличенного времени экспозиции $t_2 = k \cdot t_1$ программа выполняет регистрацию фотографии пятна рассеяния и вводит ее в модуль выделения изофоты. Эта изофота является контуром фотометрического сечения, соответствующего новому уровню относительной освещенности $E_{отн2} = t_1 / t_2$.

Таким образом, $E_{отн n} = 1 / t_{отн n} = t_1 / t_n$, поэтому каждая изофота помещается в систему координат на уровень $E_{отн n}$ и записывается в память. Когда t превышает максимальное значение t_{max} , работа программы заканчивается и на мониторе получается графическое отображение ФРТ.

В результате запоминания ряда фотометрических сечений и построения в пространственных координатах их исходного взаимного расположения формируется объемная диаграмма ФРТ, т.е. графическое отображение функции распределения освещенности в изображении точечного источника, сформированного исследуемой оптической системой. Двумерный массив численных значений ФРТ фиксируется в памяти компьютера и далее используется для вычисления ряда характеристик качества изображения, таких как ФРЛ, ЧКХ, ФКЭ.

Для реализации метода компьютерной изофотометрии была разработана установка контроля качества изготовления оптических систем.

Установка обеспечивает определение характеристик качества изображения оптических систем с фокусным расстоянием до 500 мм, диаметром входного зрачка до 150 мм. Принципиальная схема установки показана на рис. 67 .

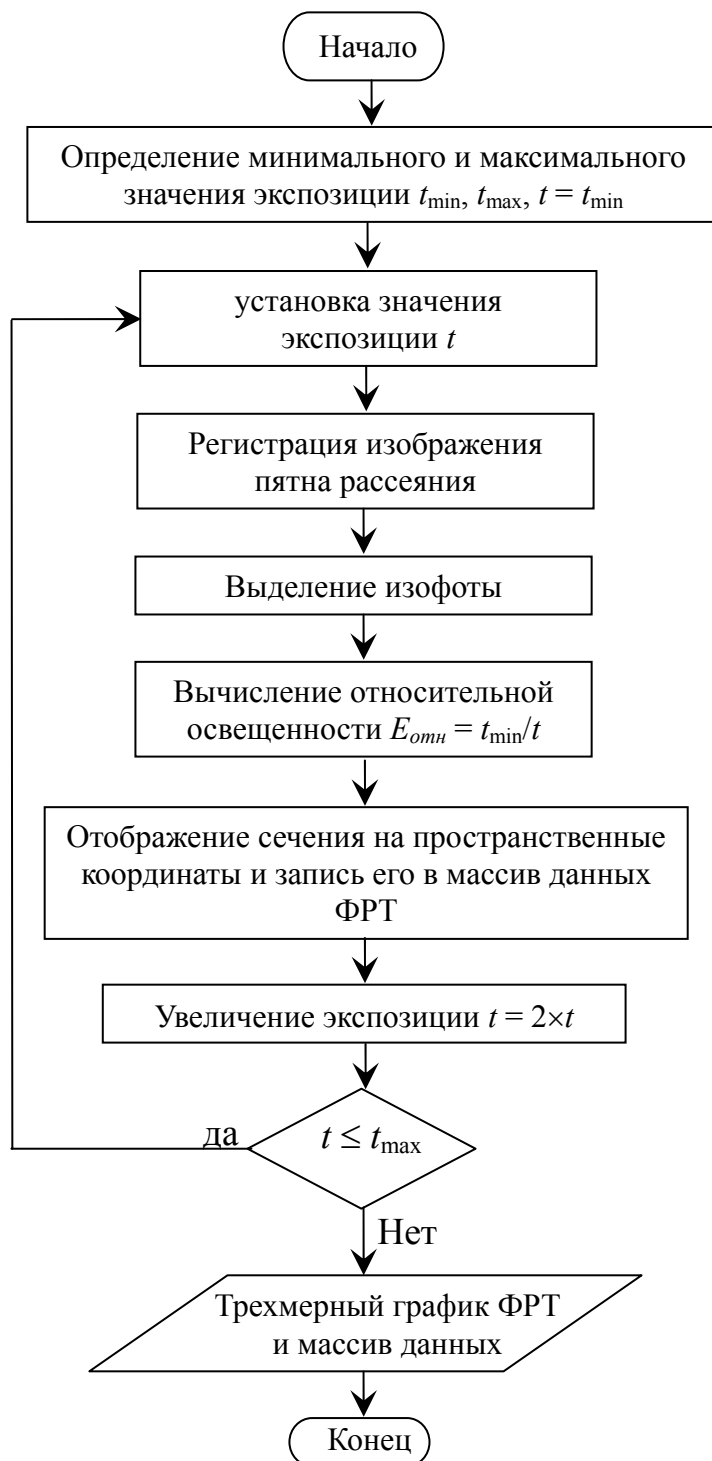


Рис. 66. Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением

Тест-объектом в данном методе испытания системы служит освещенная круглая диафрагма малого диаметра. Диаметр точечного источника, используемого при количественных исследованиях высокоточных систем, должен быть, обычно, на порядок меньше диаметра дифракционного кружка, который способна построить исследуемая система в обратном ходе лучей.

Диаметр тест - объекта определяется из соотношения:

$$d = \frac{1,22\lambda}{A_k},$$

где λ - длина волны света в схеме контроля; A_k - передняя апертура оптической системы

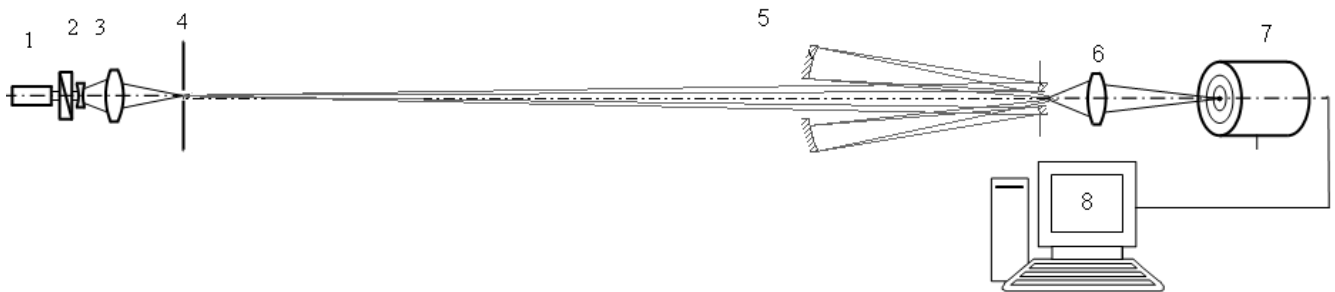


Рис.67. Схема установки для измерения ФРТ по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления: 1 – лазер; 2 - фотометрический клин; 3 - система для фокусировки лазерного пучка; 4 - точечная диафрагма; 5 - исследуемый объектив; 6 - проекционный микрообъектив; 7 – приемник изображения; 8 – компьютер

Диаметр пятна рассеяния, сформированного исследуемым объективом, в общем случае составляет несколько микрометров, соответствующих размеру одного пиксела на матрице ПЗС. Поэтому необходимо использовать микрообъектив для увеличения пятна рассеяния, чтобы центральный кружок покрывал 10 – 20 пикселей. Таким образом, увеличение микрообъектива должно быть $10\times$ - $40\times$, что зависит от типа исследуемого объектива.

Проекционный микрообъектив схемы контроля вносит свои остаточные деформации (на уровне $0,03\lambda$) в волновой фронт исследуемого объектива в схеме, которые могут войти в результат измерения, если их не учесть. Для устранения такой ошибки измерения необходимо аттестовать используемые в схеме контроля микрообъективы. Зная ошибки микрообъектива, их вычитают из общего результата измерения. Аттестацию микрообъектива необходимо проводить на интерферометре с дифракционной волной сравнения (например, типа ИН-1).

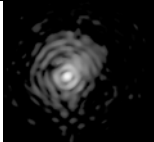
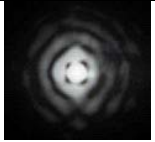
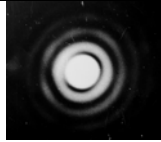
Испытания объектива экспериментального нанолитографа и исследования структуры пятна рассеяния

Установка, описанная выше, работает на основе регистрации и анализа пятна рассеяния, образованной исследуемым объективом в плоскости изображения. После определения ФРТ программа дает ряд необходимых характеристик качества изображения в виде графиков или таблиц с высокой степенью наглядности. Контрольная длина волны, используемая в установке – $\lambda = 0.633$ мкм.

Успешное применение современного метода изофотометрии для измерения ФРТ в диапазоне до $4 \div 5$ порядков дает возможность определения характеристик качества изображения с высокой точностью и оперативностью (несколько секунд для одного измерения).

В таблице 4 показано изменение изображения пятна рассеяния, сформированного исследуемой оптической системой на различных технологических этапах. На рисунке 5а показана функция рассеяния точки исследуемого объектива для случая аттестационного контроля, на рисунке 5б показана функция концентрации энергии.

Таблица 14. Эволюция пятна рассеяния объектива экспериментального нанолитографа в процессе изготовления

Промежуточный контроль	Промежуточный контроль	Аттестационный контроль
		
увеличение: 20 крат	увеличение: 40 крат	увеличение: 60 крат

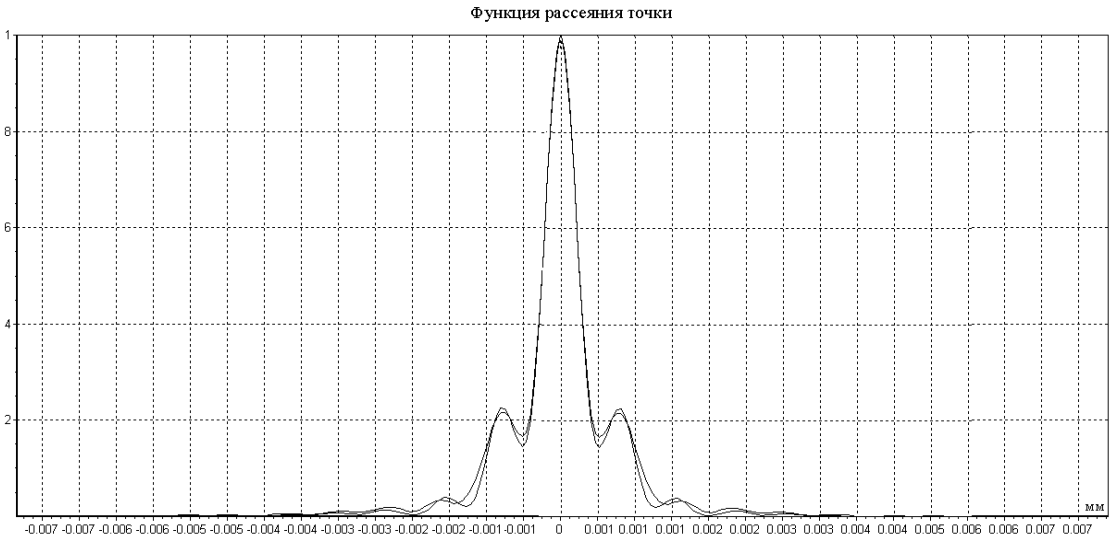


Рис. 68а. Функция рассеяния точки исследуемого объектива экспериментального нанолитографа

Итак, разработана установка контроля качества изображения оптической системы экспериментального нанолитографа. Проведено экспериментальное исследование качества изображения объектива экспериментального нанолитографа на разработанной установке. Результаты согласуются с расчетными характеристиками объектива.

В разделе рассмотрен метод контроля асферических компонентов, предназначенных для фокусировки лазерного излучения, методом компьютерной изофотометрии. Обработка данных ведется в реальном времени, что позволяет получать результаты в момент контроля асферического компонента.

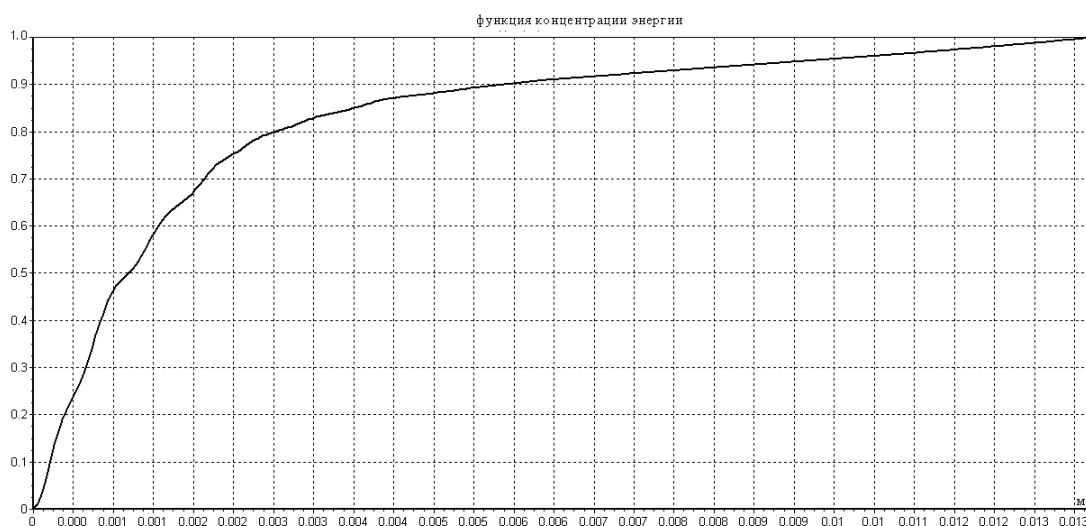


Рис 69б. Показана функция концентрации энергии объектива экспериментального нанолитографа

ИССЛЕДОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ

В оплотехнике существует ряд задач, связанных с фокусировкой лазерного излучения, или обратной задачи, связанной с проекцией объекта исследования на бесконечность. К таким задачам можно отнести построение различного рода осветительных схем или фокусировку излучения для обработки материалов. Такие задачи решаются при помощи асферических компонентов, чаще всего однолинзовых, с исправленной сферической аберрацией.

Существующие способы контроля асферических поверхностей таких компонентов требуют использования специальных схем, действие которых основано на использовании автоколлимационных точек. Для получения теневой или интерференционной картины одновременно от всей контролируемой поверхности необходимо, как правило, дополнительное сферическое зеркало высокого качества, диаметр которого в несколько раз больше диаметра контролируемой поверхности. Указанное обстоятельство в некоторых случаях имеет решающее значение и заставляет отказываться от применения схем такого рода в связи с тем, что изготовление высокоточного зеркала большого диаметра представляет собой не менее сложную задачу, чем изготовление самой асферической поверхности.

Как правило, рассматриваемые асферические компоненты имеют малую величину волновой аберрации, поэтому контроль таких оптических систем может вестись на интерферометрах типа «Zygo» и аналогичных ему интерферометрах так же, как и контроль оптических систем типа кинообъективов и фотообъективов, благодаря чему можно делать выводы о качестве изготовленного компонента. Применение интерферометрического контроля для аттестации асферических компонентов средней точности нежелательно в том плане, что стоимость интерферометрического контроля в разы дороже самого оптического компонента.

Самый дешевый метод определения годности оптической детали – определение визуальной разрешающей способности на оптической скамье, но этот метод достаточно субъективен и мало информативен в плане определения оптических характеристик компонента. С другой стороны, при исследовании оптических элементов чрезвычайно ценной является возможность определения характеристик качества реального изображения, таких, например, как функция передачи модуляции (ЧКХ) или функция концентрации энергии (ФКЭ), по результатам прямого измерения пятна рассеяния.

Существует три группы методов количественной оценки структуры пятна рассеяния:

- методы фотоэлектрического сканирования ,
- методы фотографической фотометрии,
- изофотометрические методы .

При выборе метода контроля асферических компонентов с исправленной сферической абберацией принимались во внимание следующие требования: простота, надежность и объем получаемой информации. Таким критериям соответствует метод изофотометрии.

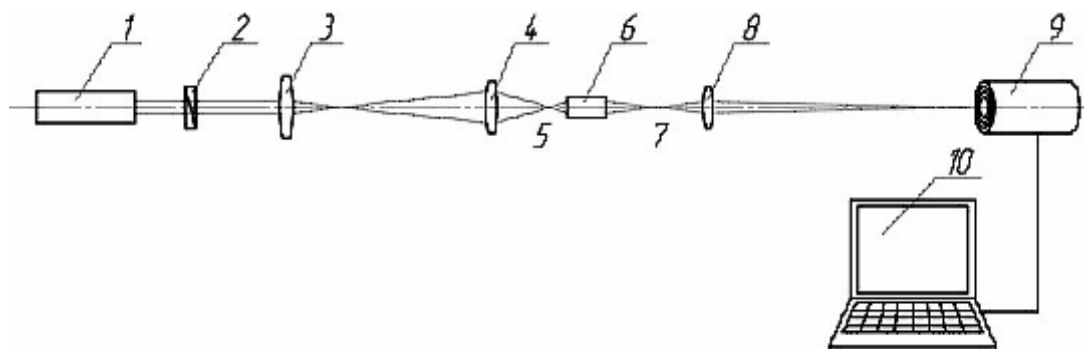


Рис.70. Принципиальная схема установки для контроля качества изображения микрообъектива методом лазерной компьютерной изофотометрии ФРТ

1 – He-Ne лазер; 2 – фотометрический клин; 3 – объектив осветительной системы; 4 – объектив, формирующий точечный тест-объект; 5 – сформированный точечный источник; 6 – исследуемая система; 7 – пятно рассеяния; 8 – проекционный микрообъектив; 9 – матрица телевизионной камеры; 10 – компьютер

На основе данного метода была создана установка для контроля качества изображения по ФРТ асферического компонента. Схема установки показана на рисунке 70.

СУЩНОСТЬ СПОСОБА ЛАЗЕРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ

Метод изофотометрии основан на получении серии снимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции на фотоприемнике предельного контраста, т.е. получении совокупности фотометрических сечений, соответствующих различным уровням равной освещенности. Каждое

фотометрическое сечение формируется как фигура с четким контуром, который называется изофотой. Из системы изофот можно получить карту распределения относительной освещенности ($\tilde{E}$) в пятне рассеяния.

Для компьютеризации метода разработано алгоритмическое и программное обеспечение [26]. При этом для реализации метода используются серийные цифровые видеокамеры, которые обладают способностью изменения времени накопления в широком диапазоне, что может обеспечить изофотометрию освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более четырех порядков. В частности, для созданной экспериментальной установки была использована матричная видеокамера VAC-135; ее диапазон изменения относительного времени накопления составляет 1—2047, т.е. свыше трех порядков.

На рис.70 изображена принципиальная схема установки. Сформированный первичный точечный источник света посылает расходящийся пучок в зрачок микрообъектива 4, работающий с уменьшением и формирующий, в свою очередь, точечный тест-объект 5 необходимого размера для аттестации исследуемого микрообъектива 6. Для этого апертура объектива 4 должна превышать апертуру объектива 6. Исследуемая система 6 строит пятно рассеяния 7. Это изображение переносится с увеличением при помощи микрообъектива 8 на чувствительную площадку приемника изображения 9 (ПЗС-камеры). Камера преобразует оптическое изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния) в видеосигнал и посылает его в компьютер 10 через порт USB. Совокупность ряда фотометрических сечений и суммированного в пространственных координатах их исходного взаимного расположения представляет собой карту ФРТ, т.е. функцию распределения интенсивности в изображении точечного источника, построенного исследуемой оптической системой.

Программа “Videoprocess”, разработанная аспирантом Ле Зуи Туаном, позволяет наблюдать экранное отображение пятна рассеяния и строить его трехмерную модель для выполнения настройки установки. Кроме того, на дисплей выводятся карта (изофотограмма) ФРТ и графики ФРЛ в двух перпендикулярных сечениях. Далее, программа выполняет расчет и отображение функции концентрации энергии (ФКЭ) и функции передачи модуляции (ФПМ или ЧКХ) в качестве характеристик качества изображения исследуемой оптической системы.

Таким образом, благодаря применению современных компьютерных технологий высокоэффективный метод изофотометрии с переменным временем накопления реализован в виде автоматизированной компьютерной версии и оснащен достаточно полным аппаратом обработки и интерпретации измерительных данных.

Таблица 15. Обработка измерительных данных изофотометрии

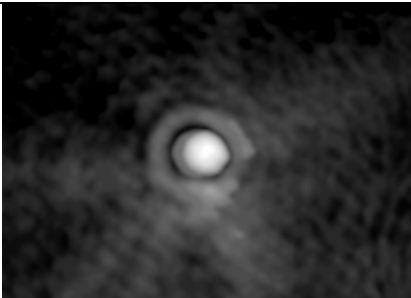
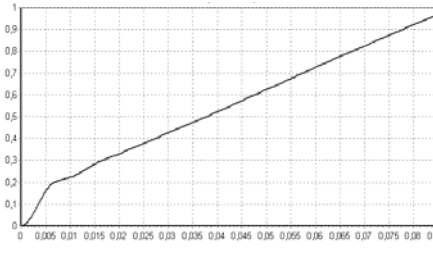
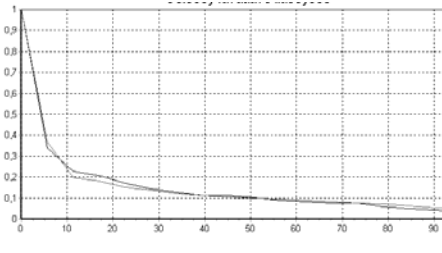
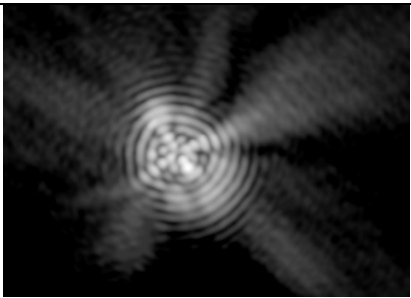
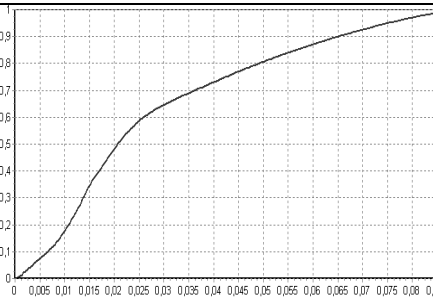
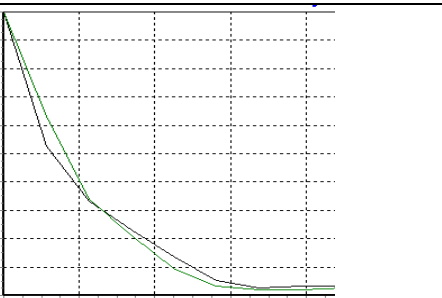
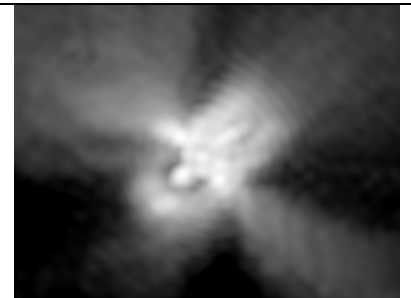
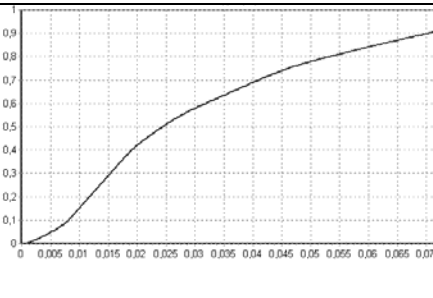
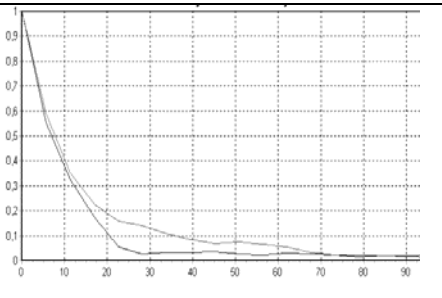
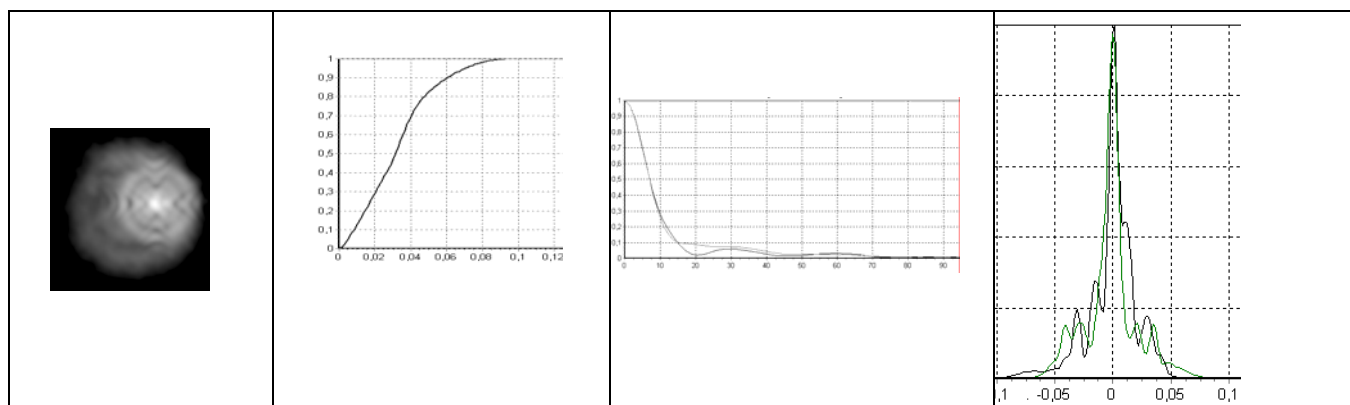
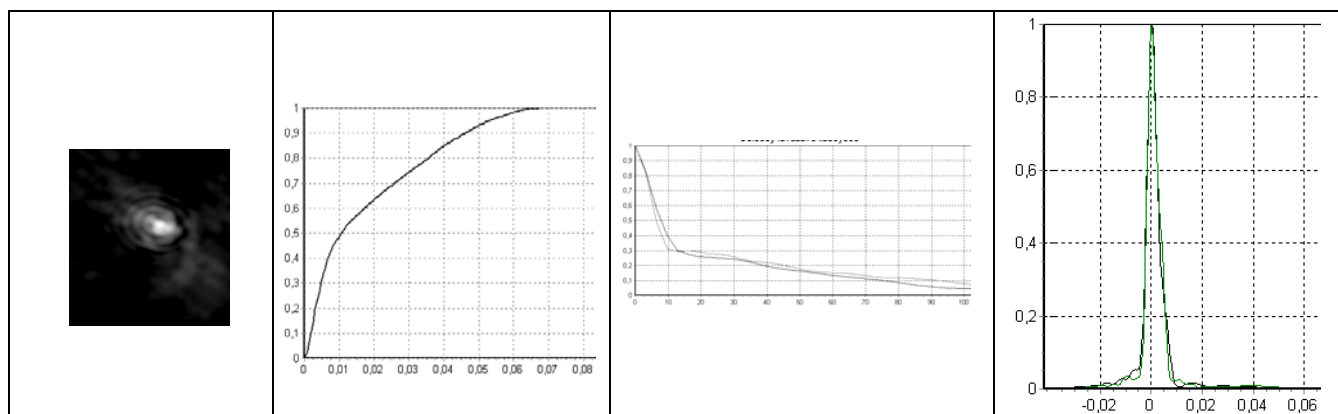
Изображение точки	Концентрация энергии	ЧКХ
		
		
		

Таблица 15. Контроль линзы для исследования глазного дна





ЛИТЕРАТУРА

1. Духопел И. И., Качкин С. С., Чунин Б. А.. Изготовление и методы контроля асферических поверхностей. Практическое руководство по изготовлению и контролю оптических деталей с асферическими поверхностями. Л. Машиностроение. Ленинградское отделение. 1975.
2. Слюсарев Г. Г. Геометрическая оптика. АН СССР, 1946.
3. Русинов М. М. Техническая оптика. Машгиз, 1961.
4. Мартин Л. Техническая оптика. Физматгиз, 1960.
5. Куликовская Н. И. и др., ОМП, 1971, № 7, стр. 57.
6. Гальперн Д. Ю., ОМП, 1971, № 7, стр. 21.
7. Стронг Д. Техника физического эксперимента. Лениздат. 1948.
8. Максutow Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М. Наука. 1984. 280 с.
9. Карлин О. Г., Сюткин В. А., ОМП, 1972, № 3, стр. 37.
10. Пуряев Д. Т. Изв. ВУЗов, Приборостроение, 1963. VI, № 4, стр. 131.
11. Пуряев Д. Т. ОМП, 1966, № 6, стр. 44.
12. Пуряев Д. Т. и др. Изв. ВУЗов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1969, № 2, стр. 206.
13. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение. 1976 г.
14. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение. 1976 г.
15. Савин В. А., Федина Л. Г., Новая техника в астрономии, 1970, вып. 3, стр. 207.
16. Забелин А. А. Авторское свидетельство № 205550, Бюл. изобр., 1967, № 19.
17. Гаврилов Е.В. «Особенности анализа объектива для формирования наноструктур» // Вестник конференции молодых ученых СПб ГУ ИТМО, 2008 г.
18. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Л.ЛИТМО. 1990. 52 с.

19. Линник В.П. Простой интерферометр для исследования оптических систем. Труды ГОИ. Том X. Выпуск 95. Ленинград. 1934.
20. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение. 1984. 231 с.
21. Вознесенский Н.Б., Гаврилов Е.В., Жевлаков А.П., Кирилловский В.К., Орлов П.В., Интерференционный контроль асферических компонентов объектива для нанолитографии// ЖТФ-2007-Том 75- вып.2.
22. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2006.
23. Виноградова Г.И., Вознесенский Н.Б., Домненко В.М., Иванова Т.В. Математическое моделирование интерференционных картин в интерферометре с дифракционно формируемым волновым фронтом сравнения// ОЖ, 1999, том 66, №2.
24. Виноградова Г.Н., Герловин Б.Я. Некоторые особенности интерферометра с дифракционной волной сравнения // ОЖ, 2001, том 68, №11.
25. Сейсян Р.П. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем ультрафиолете // ЖТФ.2005.Том 75, вып.5.
26. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2008.
27. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2006.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РОЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ АСФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ	3
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	4
КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ	4
СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ	6
ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	8
Метод анаберрационных точек для контроля эллиптических, параболических и гиперболических поверхностей	10
КОНТРОЛЬ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ	18
Компенсационный метод	37

КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕХПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ВЫСОКИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	41
АНАЛИЗ ОБЪЕКТИВА ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНО ДАЛЬНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ	43
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ	53
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ	53
ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРКАЛ НАНООБЪЕКТИВА	70
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ И СХЕМ КОНТРОЛЯ ПРИ СБОРКЕ И ЮСТИРОВКЕ 2-Х ЗЕРКАЛЬНОГО ПРОЕКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА	71
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАНОЛИТОГРАФА	74
КОНТРОЛЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БАЗОВОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАНОЛИТОГРАФИИ	75
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОГО (малого) ЗЕРКАЛА	78
КОНТРОЛЬ ВОГНУТОГО ЗЕРКАЛА	81
Интерферометр сдвига	92
Стратегия изготовления объектива экспериментального нанолитографа	100
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ	114

СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы и успешно реализовал инновационную образовательную программу «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», что позволило выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворять возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях науки. Реализация этой программы создала основу формирования программы дальнейшего развития вуза до 2015 года, включая внедрение современной модели образования.

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Название кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета) отражает новейшую тенденцию проникновения компьютерных технологий во все



сферы науки и техники. В то же время эта кафедра является прямой наследницей старейших оптических кафедр России – кафедры теории оптических приборов, физиологической оптики, оптических приборов, лабораторных, а затем оптико-механических приборов. В разное время этими кафедрами заведовали и работали на них такие выдающиеся ученые как академик В.П. Линник, член-корреспондент Академии наук СССР профессор В.С. Игнатовский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук В.Н. Чуриловский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Ленинской и четырех Государственных премий, премии Французской Академии наук, профессор, доктор технических наук М.М. Русинов, заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор, доктор технических наук И.И. Крыжановский, член-корреспондент Академии артиллерийских наук, профессор, доктор технических наук А.Н. Захарьевский, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Ленинской премии и премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук В.А. Зверев, лауреат Государственной премии и премии Совета Министров СССР профессор, доктор технических наук А.П. Грамматин, лауреат Государственной премии профессор, доктор технических наук П.Д. Иванов, лауреат премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук С.А. Родионов.

Таким образом кафедра прикладной и компьютерной оптики по праву может считаться ведущей оптической кафедрой России, продолжающей дело таких основоположников как В.С. Игнатовский, В.Н. Чуриловский, М.М. Русинов, В.П. Линник, А.Н. Захарьевский, и собравшей в своем составе ведущих представителей школы прикладной и вычислительной оптики: Л.Н. Андреева, А.П. Грамматина, В.А. Зверева, П.Д. Иванова, С.А. Родионова и их учеников.

В списке достижений кафедры: создание непревзойденных широкоугольных аэрофотосъемочных объективов с улучшенным светораспределением по полю и приборов обработки аэрофотоснимков (М.М. Русинов, Н.А. Агальцова), превосходящие зарубежные аналоги гидросъемочные объективы (М.М. Русинов, П.Д. Иванов, Л.Н. Курчинская), методы и средства контроля главного зеркала телескопа БТА (В.А. Зверев, С.А. Родионов, В.К.Кирилловский, В.В. Усоскин), металлостеклянная оптика (И.И. Крыжановский, С.М. Никитин), оптика для космического проекта “Вега” (Г.И. Цуканова), высокоскоростные кинокамеры для научных исследований (И.И. Крыжановский, В.И. Решеткин), компьютерные пакеты автоматизированного проектирования оптики (С.А. Родионов с сотрудниками). Эти достижения в свое время были отмечены двумя ленинскими премиями, пятью государственными премиями, премией Совета Министров СССР, премией французской академии наук.

В настоящее время кафедра ведет подготовку специалистов и научную работу в следующих взаимосвязанных направлениях:

- теория и проектирование оптических систем, традиционно называемые вычислительной оптикой;
- оптические измерения и контроль оптических элементов и систем;
- оптические приборы, включая общую теорию, микроскопы и контрольно-измерительные приборы, геодезические приборы, офтальмологическая оптика;
- математические методы, алгоритмы, программы и компьютерные системы решения оптических задач, что можно коротко назвать компьютерной оптикой.

О последнем направлении следует сказать несколько подробнее. Следует подчеркнуть тот известный факт, что вычислительная оптика не только явилась первым практическим приложением для компьютеров (одним из первых применений первой в мире ЭВМ Марк-1 в 1944 году был расчет оптических систем), но и способствовала развитию многих новых методов прикладной математики (методов оптимизации, численного интегрирования, решения некорректных задач и т.д.)

В России работы в этом направлении были начаты А.П. Грамматиным (1958 г.). В ЛИТМО в 1960 году были построены одни из первых отечественных ЭВМ ЛИТМО-1 и ЛИТМО-2, предназначенные главным образом для расчета оптических систем; а соответствующий математический аппарат был разработан доцентом кафедры оптико-механических приборов В.В. Хваловским.

С 1965 г. на кафедре оптико-механических приборов благодаря новаторским идеям и методам С.А. Родионова получает развитие новое направление в

прикладной оптике – разработка математических методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптических задач. Результаты фундаментальных исследований С.А. Родионова в области формирования изображения, теории дифракции и математического моделирования были положены в основу разработки пакета программ для автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ, широко известного в оптической промышленности.

В настоящее время объектами исследований в области компьютерной оптики, проводимых на кафедре являются:

- методы и программы проектирования оптических систем (методы синтеза, анализа aberrаций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);
- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманогаммы, изофотограммы и т.п.);
- компьютерное моделирование изображения с учетом различных факторов (частичная когерентность, поляризация, нелинейности и неизопланатизм и т.д.)
- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;
- моделирование процессов ближнепольной оптики.

Основным и наиболее перспективным направлением развития кафедры представляется именно компьютерная оптика как основа для подготовки так называемых “компьютерных инженеров” – специалистов, профессия которых, по нашему мнению и по мнению авторитетных зарубежных экспертов, станет ведущей в наступающем веке.

Область деятельности таких специалистов – это решение сложных инженерных и научных задач (в нашем конкретном случае прикладной оптики) на основе интенсивного использования математических методов и компьютерных технологий, а также разработка такого рода технологий.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

- фундаментальных и широких знаний в области предмета разработки и исследования (прикладной оптики, оплотехники, оптических приборов и систем);
- глубоких знаний прикладной математики, включая математическое моделирование, численные методы, методы оптимизации и т.п.;
- владения современными компьютерными технологиями, особенно применяемыми в инженерной и научной деятельности.

Как показывает опыт, задачи прикладной оптики настолько разнообразны, сложны и комплексны, а применяемые для их решения методы, модели и средства настолько универсальны, что специалист по компьютерной оптике может с успехом практически безо всякой адаптации работать в любой области, требующей владения математическими методами и компьютерными технологиями.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сервере: **aco.ifmo.ru**

Владимир Константинович Кирилловский,
Егор Валерьевич Гаврилов

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 7.

Инновационные методы контроля при изготовлении
прецизионных асферических поверхностей

Учебное пособие

В авторской редакции

Дизайн

И.И. Иванов

Верстка

П.П. Петров

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий, механики и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 28.09.09

Заказ № 2144

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

