

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

В.К.Кирилловский

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 5

Аберрации и качество изображения

Санкт-Петербург

2006

УДК 535.317.2.

В.К.Кирилловский. Оптические измерения. Часть 5.
Аберрации и качество изображения.
СПб ГУ ИТМО. 2006.- 107 с.

Цель пособия - ознакомить студентов с теоретическими основами и методами оптических измерений как с позиций оптика-конструктора и исследователя, так и с общеметрологических позиций, связанных с задачами и спецификой классических и современных оптических измерений. Пособие состоит из серии выпусков.

В Части 5 рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибок оптических поверхностей. Рассмотрены современные косвенные методы оценки качества изображения оптических систем путем компьютерной расшифровки интерферограмм и математической обработки интерферометрической информации с целью определения характеристик качества изображения. Даны характеристики точности интерферометрии и современные методы повышения точности.

Указаны пути применения компьютеров в оптическом приборостроении при измерениях и контроле аберраций и качества изображения.

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики 16 мая 2006 г., протокол N 6.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров, магистров и дипломированных специалистов 200200 – Оптотехника.

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

2006

©В.К.Кирилловский
2006

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина "Оптические измерения" относится к базисным дисциплинам содержания образовательных программ по направлению подготовки "Оптотехника". Цель изучения дисциплины – освоение обучающимися теоретических, практических и метрологических основ классических и современных оптических измерений.

В Части 5 рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей. Рассмотрены современные косвенные методы оценки качества изображения оптических систем путем компьютерной расшифровки интерферограмм и математической обработки интерферометрической информации с целью определения характеристик качества изображения. Даны характеристики точности интерферометрии и современные методы повышения точности.

Указаны пути применения компьютеров в оптическом приборостроении при измерениях и контроле аберраций и качества изображения.

Рассмотрим место и задачи оптического контроля и исследований в процессе создания, производства и применения оптических систем и приборов. В основе современной системы познания материального мира лежит измерение. Закономерные связи, находящиеся в природе, обнаруживаются чаще всего в численной форме, в результате количественных оценок наблюдаемых объектов и явлений. От развития методов и средств исследований и измерений, от пределов точности и чувствительности, достигаемых в процессе измерений, зависит достоверность описания исследуемых объектов и, в конечном итоге, адекватность модели окружающего нас мира.

Из всех известных методов измерений оптические измерения относятся к наиболее точным. Пороговая чувствительность и точность классических методов оптических измерений находится на уровне длины волны применяемого излучения, которая для видимого (светового) излучения составляет величину порядка 0.5 мкм. Современные технологии, в том числе электронные и компьютерные, как и другие научно-технические достижения, дают возможность повышения точности и чувствительности еще в десятки раз. Незаменимым свойством результатов оптических измерений и исследований является их наглядность, надежность и убедительность. Отсюда значительная и все возрастающая роль оптических измерений в большинстве областей естественнонаучных и научно-технических исследований, в технической, медицинской и биологической практике.

Сложный процесс создания современной оптической системы может быть разделен на два этапа: проектирование и изготовление. На первом этапе

производятся расчет параметров системы и расчетная оценка качества изображения, которое она может обеспечить. При изготовлении стремятся получить реальную систему с параметрами, насколько возможно близкими к расчетным. Полученное качество изображения оценивается средствами оптических измерений.

Сведения о структуре изображения, построенного изготовленной оптической системой, могут быть получены прямым и косвенным путем. Способы прямой оценки состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы, и измерении фотометрической структуры этого изображения. В качестве тест-объектов обычно используются освещенная точечная диафрагма, узкая щель, полуплоскость, линейная и радиальная решетки абсолютного контраста, решетка с синусоидальным законом распределения яркости. Данные измерений позволяют определить значения таких критериев качества изображения, как разрешающая способность, пороговый контраст, концентрация энергии и т.д.

Эти величины могут быть получены и косвенным путем - при математической обработке данных о форме волнового фронта, сформированного в зрачке исследуемой системы [7, 8]. Преимущества косвенных методов состоят в том, что они позволяют по известной топографии отклонений фронта волны рассчитать большинство характеристик качества изображения. Результаты, полученные этими методами, не зависят от особенностей приемника изображения в схеме контроля. Косвенные методы дают возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения, что служит предпосылкой широкого применения косвенных методов в условиях производства, например - при обработке оптических поверхностей, изготовлении оптических элементов и юстировке оптических систем.

В ряде случаев косвенные методы обеспечивают высокую точность измерения отдельных характеристик системы, например, концентрации энергии в изображении, если этому не препятствуют ограничения, присущие таким методам.

К ограничениям косвенных методов следует отнести сложный математический аппарат обработки данных, требующий использования наиболее современных компьютеров и сложного, дорогостоящего программного обеспечения.

Кроме того, следует иметь в виду, что при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения ряда факторов, действующих при изготовлении оптической системы, например таких, как:

- малые дефекты оптических поверхностей, возникающие в процессе обработки, например, при ретуши астрономических зеркал,
- нечистота и шероховатость оптических поверхностей,
- мелкоструктурные свили и неоднородности оптических материалов при работе в проходящем свете,

- дефекты оптических покрытий и дефекты склеек в оптических компонентах,
- светорассеяние и блики в оптической системе и в приборе.

Эти факторы могут быть учтены прямыми методами оценки качества изображения (см. Часть 4). Таким образом, в ответственных случаях, при изготовлении и аттестации оптических систем новых классов точности, таких как космические телескопы, прецизионные исследовательские микроскопы, а также оптические системы для технологий микро- и нано-литографии, необходимо совместное применение как косвенных, так и прямых методов определения характеристик качества изображения.

Об истории методов исследования аберраций оптических систем и ошибок оптических поверхностей

Теневой метод Фуко

Более ста лет теневой метод Фуко (см. Часть 2) считался чисто качественным. Однако, а последние годы появились работы направленные на получение количественных оценок ошибок системы по данным испытаний теневым методом. К достоинствам теневого метода относятся:

- простота реализации и экономичность,
- высокая чувствительность при обнаружении и оценке деформаций волнового фронта и ошибок оптических поверхностей,
- наглядность, позволяющая обнаружить отдельные ошибки и отметить их расположение на оптической поверхности или в зрачке, а также указать общий характер аберраций (кома, сферическая, астигматизм и их сочетания).

Метод Гартмана

Дальнейшее развитие методов испытания оптических поверхностей и систем, развитие и расширение в конце XIX – начале XX века серийного производства оптических систем, в частности – фотообъективов, привели к созданию Гартманом метода для оценки ошибок волновой поверхности по данным, полученным по ряду локальных точек на зрачке (см. Часть 2). Осуществляя физическое моделирование механизмов геометрической оптики, Гартман изолировал диафрагмами отдельные узкие пучки лучей, которые формировались исследуемой системой, и с помощью экстрафокальных фотографий прослеживал ход лучей, определяя, например, точки, в которых эти пучки пересекали ось.

Таким образом, достоинства метода Гартмана состоят в возможности измерения и количественной оценки аберраций оптической системы, что

позволяет оценивать оптическую систему на соответствие расчету. Метод прост в реализации.

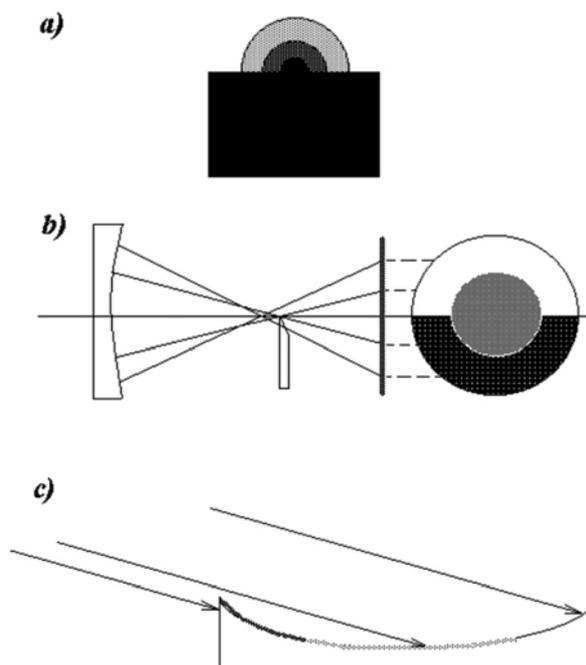


Рис. 1. Принцип теневого метода Фуко

Теневой метод можно охарактеризовать как метод, обладающий высокой наглядностью, но преимущественно качественный.

В противоположность теневому, метод Гартмана обеспечивает количественный характер исследования aberrаций, однако не обеспечивает наглядности, и рассматривание гартманогаммы aberrационно скорригированной оптической системы не позволяет судить о наличии и величине aberrаций. Эти данные могут быть определены лишь по итогам расшифровки координат пятен гартманогаммы и выполненной математической обработки данных.

Другое ограничение метода Гартмана состоит в следующем: следы отверстий диафрагмы на фотопластинке являются дифракционными изображениями, которые тем больше по диаметру и тем сильнее размыты, чем меньше диаметры самих диафрагм. Поэтому существует некоторый оптимальный диаметр диафрагмы, который, согласно Гартману, лежит в пределах между $1/200$ и $1/400$ фокусного расстояния. Этот минимум не только ограничивает размеры определяемых зон зрачка, но и их число.

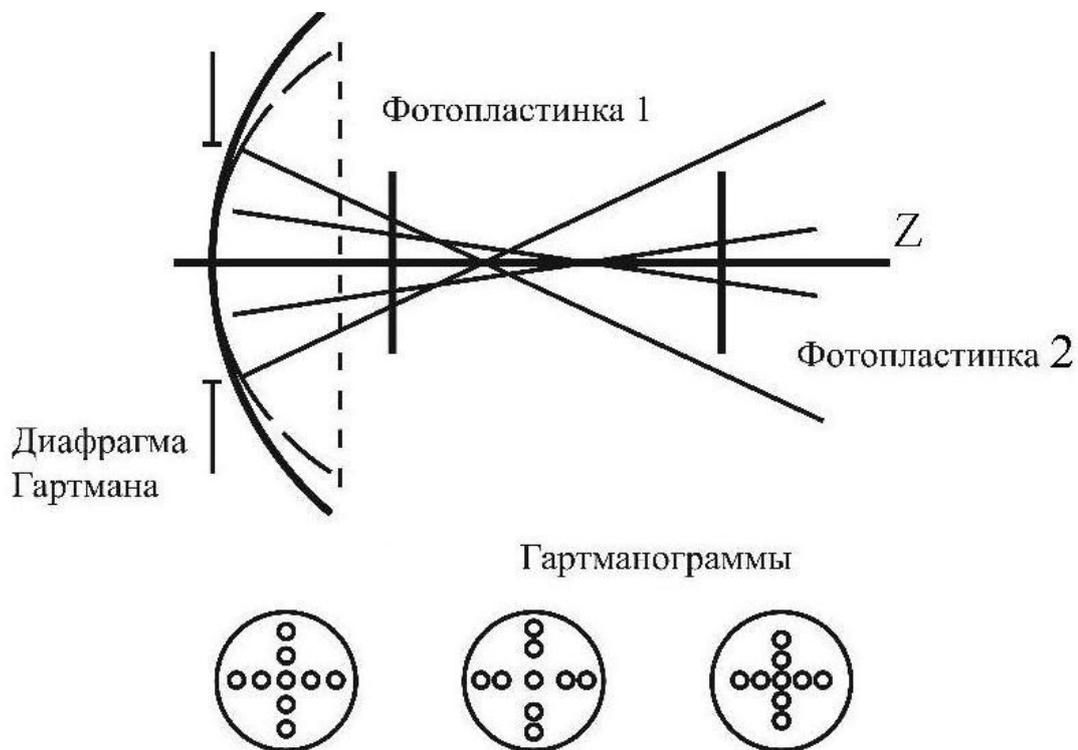


Рис. 2. Схема измерения aberrаций методом Гартмана

Интерферометрия

В 1918 г. Твайман сообщил о своем методе оценки aberrаций. Суть его состояла в сравнении плоского волнового фронта с фронтом волны от исследуемой системы, форма которой приведена к плоской для случая отсутствия ошибок и aberrаций. Т.е. речь шла об интерферометрическом методе, когда проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны (см. Часть 2).

Особое преимущество интерферограммы состоит в том, что при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте исследуемой волновой поверхности, где изолинии уровня (горизонталы) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны.

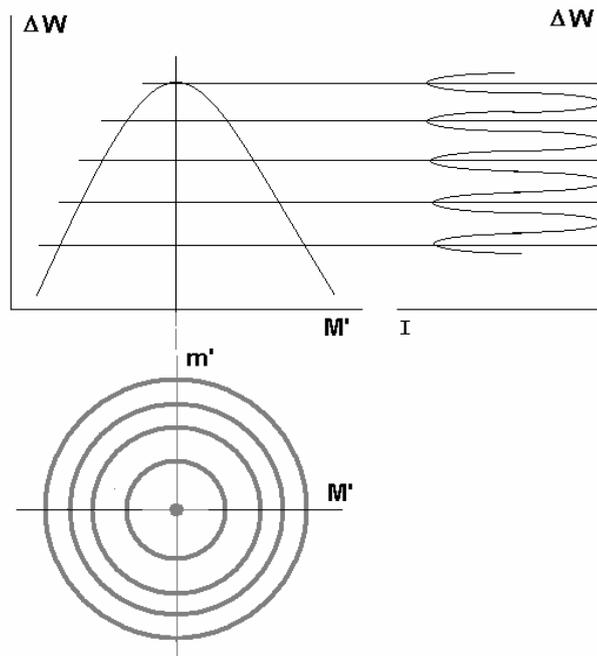


Рис. 3. Схема метода интерферометрии для варианта точной продольной и поперечной настройки интерферометра

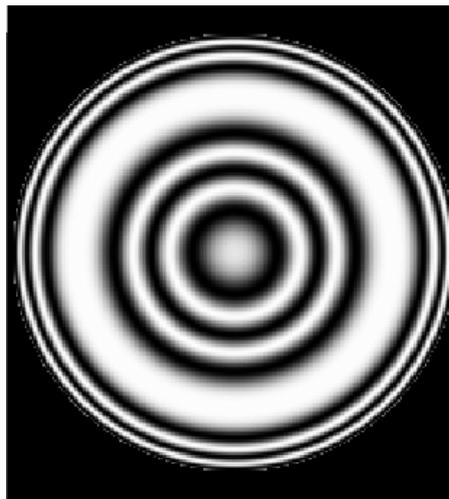


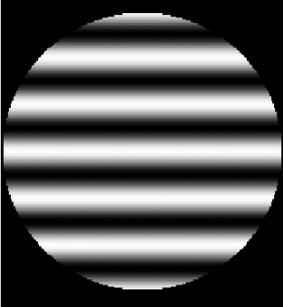
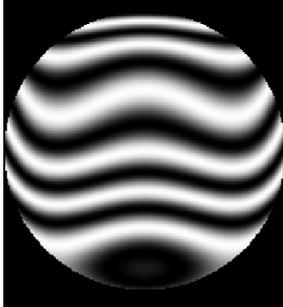
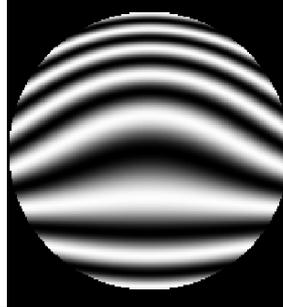
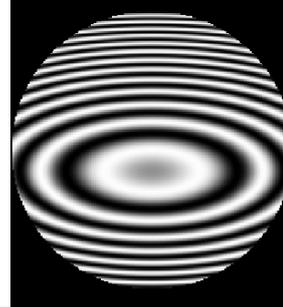
Рис.4. Вид интерферограммы, полученной в соответствии со схемой на рис.3.

Таким образом, метод интерферометрии сочетает достоинство наглядности, подобно теневому методу, с достоинством возможности количественных оценок деформаций волнового фронта, связанных с aberrациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей и элементов. Так, общий вид интерференционной картины часто позволяет опознать характер преобладающей aberrации для исследуемой системы (Табл. 1).

Вид многочисленных интерференционных картин для круглого зрачка при aberrациях разного типа подробно рассмотрен в [7 (Малакара, с.50 - 63)]. В

табл. 1 рассмотрена форма интерференционных картин для ряда типовых aberrаций.

Таблица 1

			
Отсутствие aberrаций	Сферическая aberrация	Кома	Астигматизм

Ограничение интерферометрического метода в его исходной форме состоит в том, что освещенность поперек полосы изменяется по синусоидальному закону, контуры полос неотчетливы и поэтому погрешность визуальной расшифровки не менее 0,05 ширины полосы. Современные методы специальной регистрации дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине при оптических измерениях, но и преобразовать структуру изображения к виду, позволяющему достичь максимально возможной точности при его расшифровке, в том числе и при помощи устройства автоматического ввода графиков в ЭВМ. Например, каждая интерференционная полоса синусоидальной структуры трансформируется в пару четких контуров

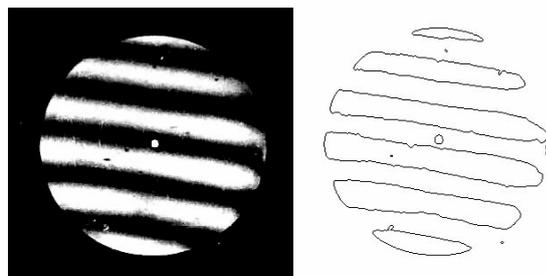


Рис.5. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности расшифровки интерферограммы

ИНТЕРФЕРОМЕТР ТВАЙМАНА

Для оптического контроля и измерений было бы желательно использовать экспресс методы, обеспечивающие точную количественную информацию обо всем исследуемом фронте волны. Начало XX века ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии. В 1918 году Твайман [7] сообщил о методе интерферометрии aberrаций объективов и ошибок оптических

поверхностей. Суть состояла в сравнении плоского опорного волнового фронта с фронтом от исследуемой системы или поверхности, форма которого приведена к плоской для случая отсутствия ошибок. Таким образом проблема исследования оптической системы ставится как задача непосредственного выявления и измерения деформаций, претерпеваемых поверхностью волнового фронта. Интерферометрия позволяет, при точно сфокусированном интерферометре, получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности, где горизонталы (изолинии уровня) представлены в виде полос с интервалом, кратным длине световой волны.

При поперечной расфокусировке интерферометра, предложенного Твайманом, возникает система полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка.

Таким образом, интерферометрия соединяет достоинство наглядности теневого метода и возможности количественных оценок и измерения деформаций волнового фронта, присущее методу Гартмана.

Твайман предложил на основании сведений о форме волнового фронта рассчитывать интенсивность светового поля, заложив таким образом основу косвенного метода экспериментального исследования качества оптической системы. Схема интерферометра Тваймана показана на рис.4.

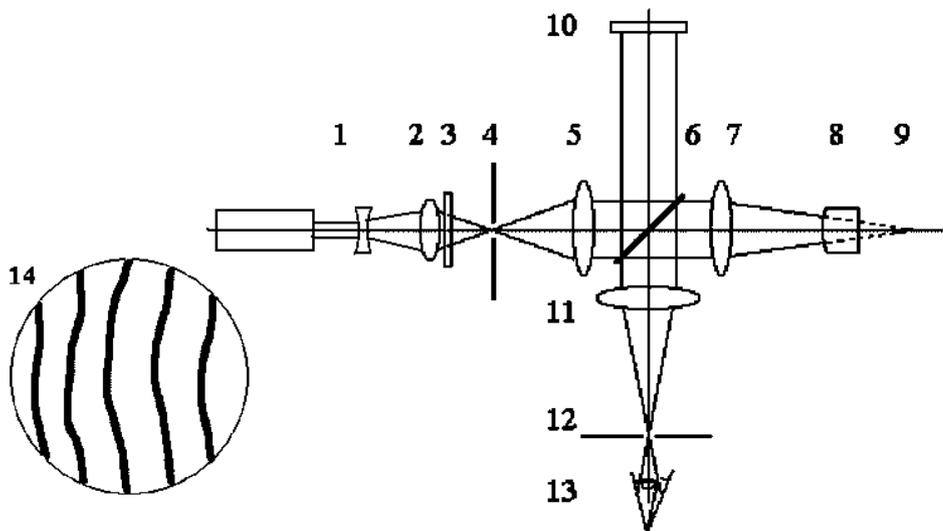


Рис.6. Интерферометр Тваймана для исследования объектива

1 - лазер, 2 и 3- осветительная система, 3 - светофильтр, 4 - точечная диафрагма, 5 - коллиматорный объектив, 6 - светоделитель, 7 - исследуемый объектив, 8 - автоколлимационное сферическое зеркало, 9 - центр кривизны автоколлимационного сферического зеркала, 10 - образцовое плоское зеркало, 11 - объектив наблюдательной системы, 12 - наблюдательная диафрагма, 13 - приемник изображения (например - глаз).

Такие решения экономически становятся экономически неоправданными при контроле систем большого диаметра или с большим фокусным расстоянием. В этих случаях полезно использовать скоростную регистрацию интерференционной картины (например, видеозапись) и последующую

покадровую расшифровку. Практика показала, что такой прием позволяет устранить вредное влияние вибрации и существенно повысить точность интерферометрии.

На теоретически возможную точность интерферометрического метода часто отрицательно влияет его чувствительность. Точность снижается, например, если среда между контролируемой и эталонной системами турбулентная или быстро изменяется, или если контролируемая система колеблется относительно эталонной.

Влияние турбулентности воздуха обычно устраняют, контролируя систему в камере с частичным вакуумом; воздействие вибраций можно уменьшить до допустимого уровня применением противовибрационных устройств.

ИНТЕРФЕРОМЕТР ФИЗО

Контроль плоской поверхности

Высокая чувствительность к вибрации двухлучевого интерферометра Тваймана, послужила стимулом к поиску схемных решений интерферометров, в которых этот недостаток снижен. В наши дни получил распространение интерферометр Физо. В его схеме рабочее плечо, содержащее исследуемую поверхность или систему, совмещено с опорным плечом, содержащим образцовую (“эталонную”) деталь или поверхность, формирующую опорный волновой фронт. Такое совмещение стало возможным благодаря применению, в качестве образцовой, детали с образцовой поверхностью, работающей в проходящем свете.

На рис.5 дана схема интерферометра Физо для контроля плоской поверхности. Здесь в качестве образцовой применяется пластина 8, фронтальная поверхность выполнена с образцовой точностью (на уровне до $1/20 \lambda$). В практике контроля поверхностей средней точности погрешности образцовой поверхности в интерферометре по традиционной схеме принято считать пренебрежимо малыми.

С целью исключения влияния паразитной интерференционной картины, возникающей при отражении плоского фронта от обратной, нерабочей поверхности образцовой пластины, эта поверхность выполнена с небольшой клиновидностью, порядка 0.5 - 1 мм снижения толщины от верхнего края пластины к нижнему. При этом возникающая паразитная интерференционная картина от обратной поверхности имеет полосы высокой частоты (порядка 1000 полос на всю поверхность), которые практически не разрешаются приемником изображения и не мешают восприятию основной интерферограммы.

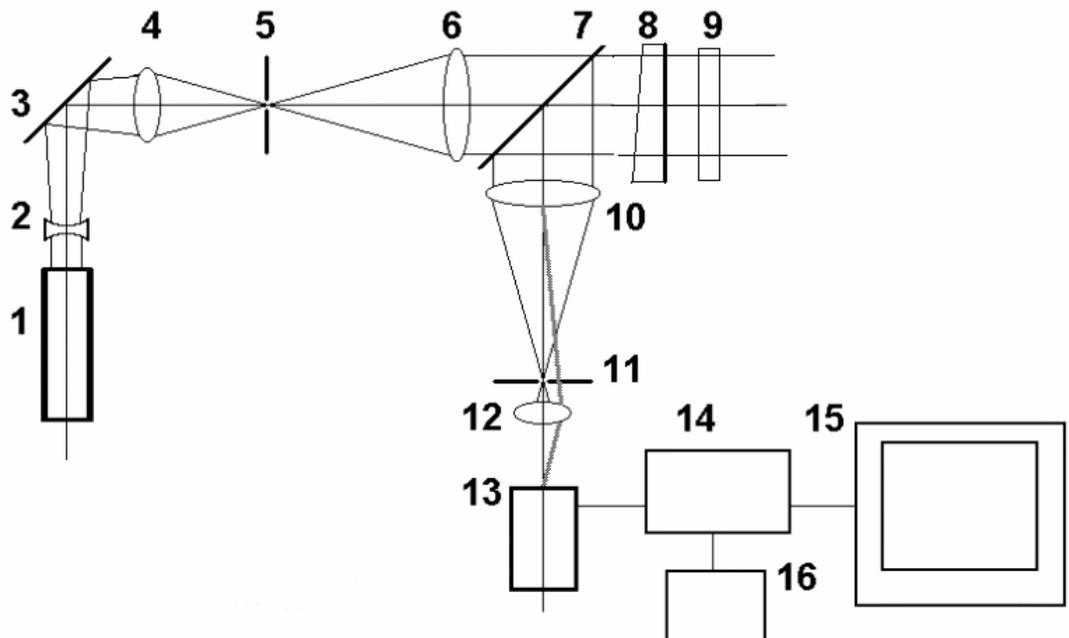


Рис.7. Схема интерферометра Физо при контроле плоской оптической поверхности

- 1 - лазер
- 2 - отрицательный компонент осветительной системы
- 3 - наклонное зеркало
- 4 - объектив осветительной системы
- 5 - точечная диафрагма
- 6 - коллиматорный объектив
- 7 - светоделитель
- 8 – пластина с образцовой плоской фронтальной поверхностью
- 9 - исследуемая плоская поверхность
- 10 - объектив наблюдательной системы
- 11 - наблюдательная диафрагма
- 12 - объектив регистрации интерферограммы (линза Бертрана)
- 13 - регистрирующая камера
- 14 - электронный блок телевизионного анализатора интерферограмм
- 15 - телевизионный монитор
- 16 - пульт управления

Контроль сферической поверхности

Интерферометр построен по схеме автоколлимационного микроскопа, в которой между исследуемой поверхностью и микрообъективом установлен мениск. Фронтальная поверхность мениска играет роль образцовой поверхности, отражая волновой фронт сравнения, интерферирующий с волновым фронтом, отраженным от исследуемой оптической поверхности.

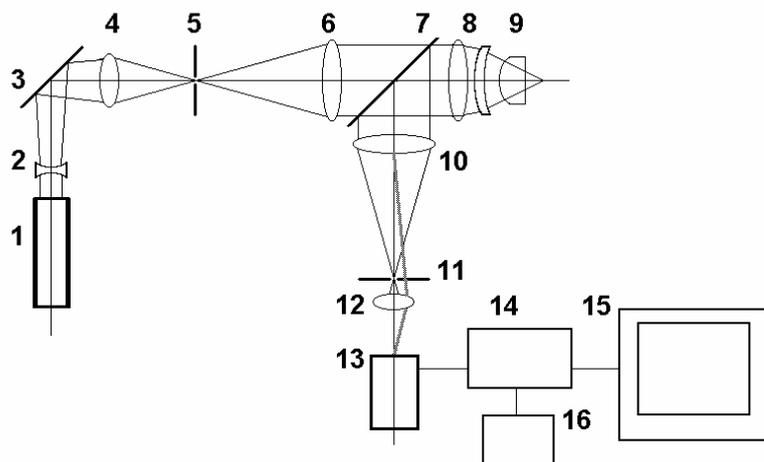


Рис. 8. Схема интерферометра Физо при контроле сферической оптической поверхности

- 1 - лазер
- 2 - отрицательный компонент осветительной системы
- 3 - наклонное зеркало
- 4 - объектив осветительной системы
- 5 - точечная диафрагма
- 6 - коллиматорный объектив
- 7 - светоделитель
- 8 - объектив интерферометра с образцовой фронтальной поверхностью
- 9 - исследуемая деталь
- 10 - объектив осветительной системы
- 11 - наблюдательная диафрагма
- 12 - объектив регистрации интерферограммы (линза Бертрана)
- 13 - регистрирующая камера
- 14 - электронный блок телевизионного анализатора интерферограмм (ТАИ)
- 15 - телевизионный монитор
- 16 - пульт управления ТАИ

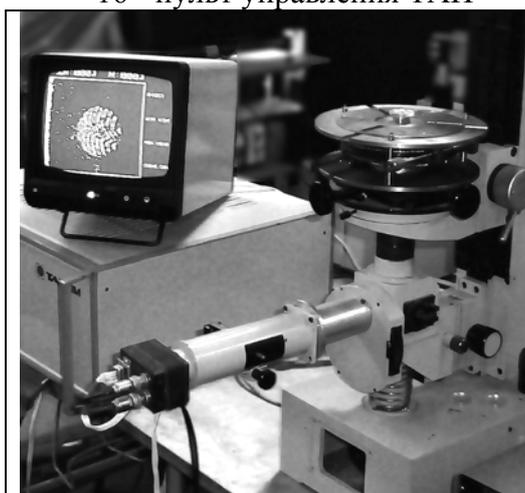


Рис. 9. Общий вид интерферометра Физо в агрегате с анализатором интерферограмм ТАИ-1 при контроле линзы



Рис.10. Контроль линзы на интерферометре Физо

Методика проведения измерений

Рассмотрим пример лабораторной методики проведения измерений.

Задача: получить интерферограммы поочередно от 3-х линз. Для этого, при выключенной линзе Бертрана, ищут автоколлимационные блики, настраивая интерферометр подвижками столика интерферометра вдоль и поперек оптической оси.

После продольного и поперечного совмещения автоколлимационных бликов включают линзу Бертрана и наблюдают интерференционную картину.

Число полос и их ориентацию изменяют поперечными подвижками столика по двум поперечным осям.

По виду интерференционной картины определить величину ошибки исследуемой оптической поверхности, как отношение максимальной стрелки прогиба интерференционной полосы к шагу (периоду) полосы.

$$\Delta N = l/h$$

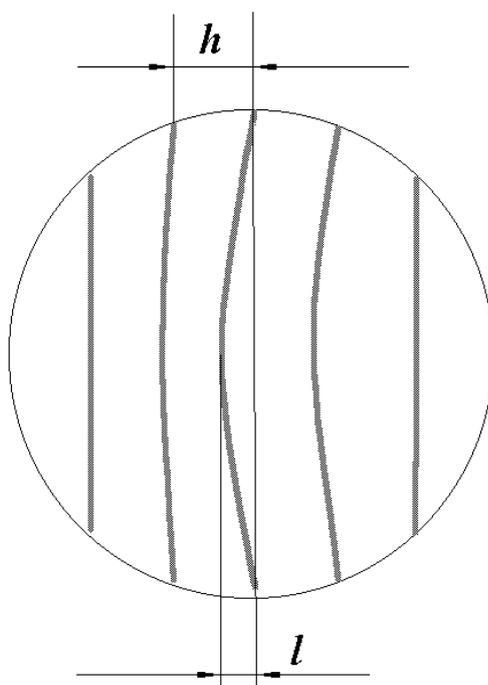


Рис. 11. Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме исходя из оценки соотношения стрелки прогиба полосы с ее шагом

На рис. 11 – 17 показаны схема для контроля объектива на интерферометре Физо, общий вид установки и ее элементов.

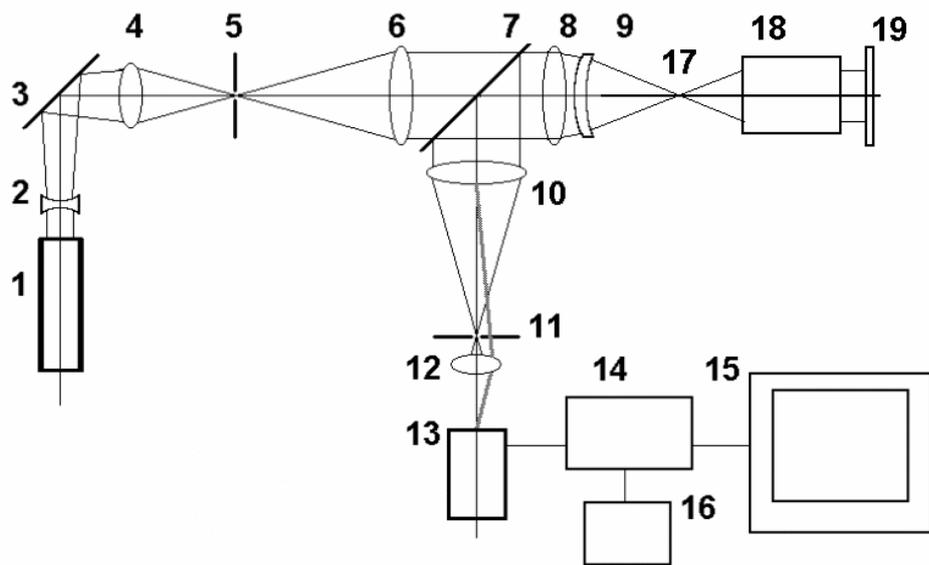


Рис.12. Схема интерферометра Физо при контроле объектива

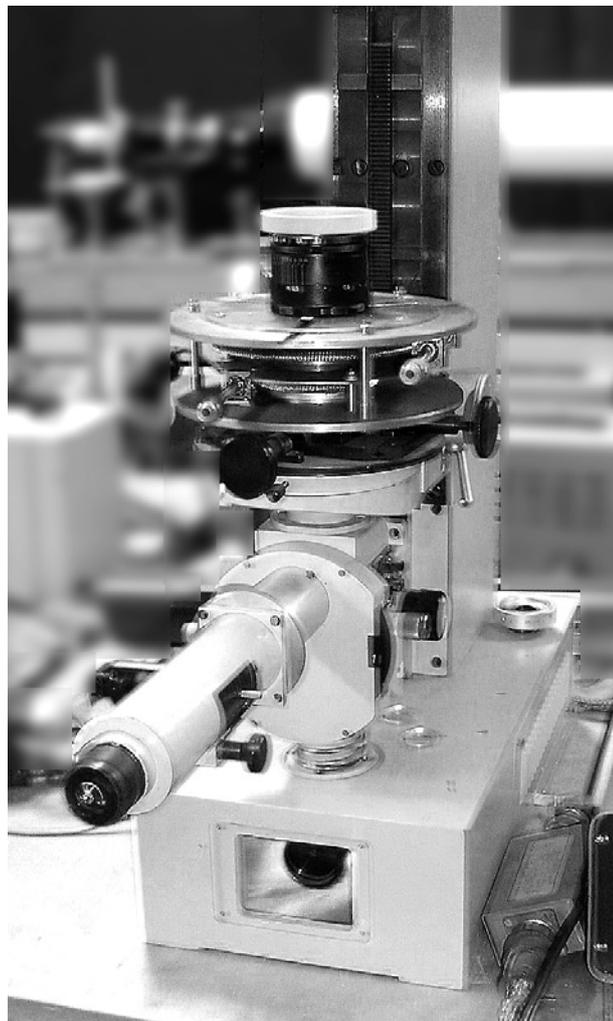


Рис. 13. Общий вид интерферометра Физо при контроле объектива



Рис.14. Контроль объектива Гелиос-44 на интерферометре Физо

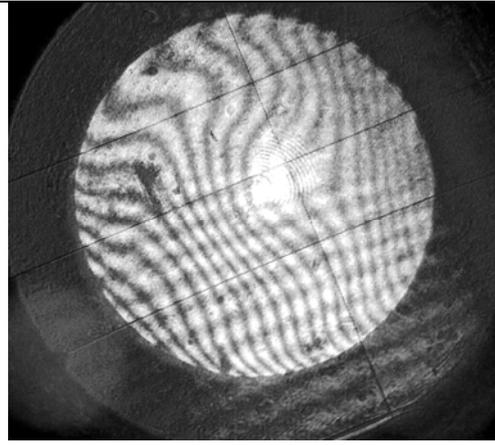


Рис.15. Интерферограмма объектива Гелиос-44

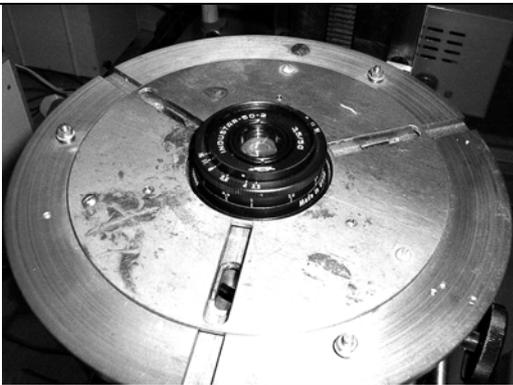


Рис. 16. Объектив Индустар-50 на интерферометре Физо

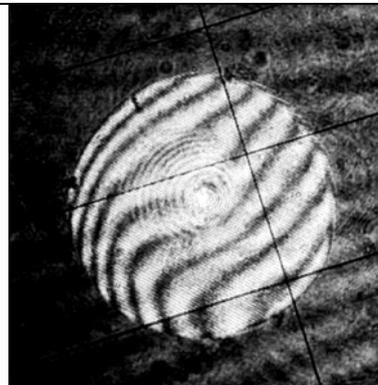
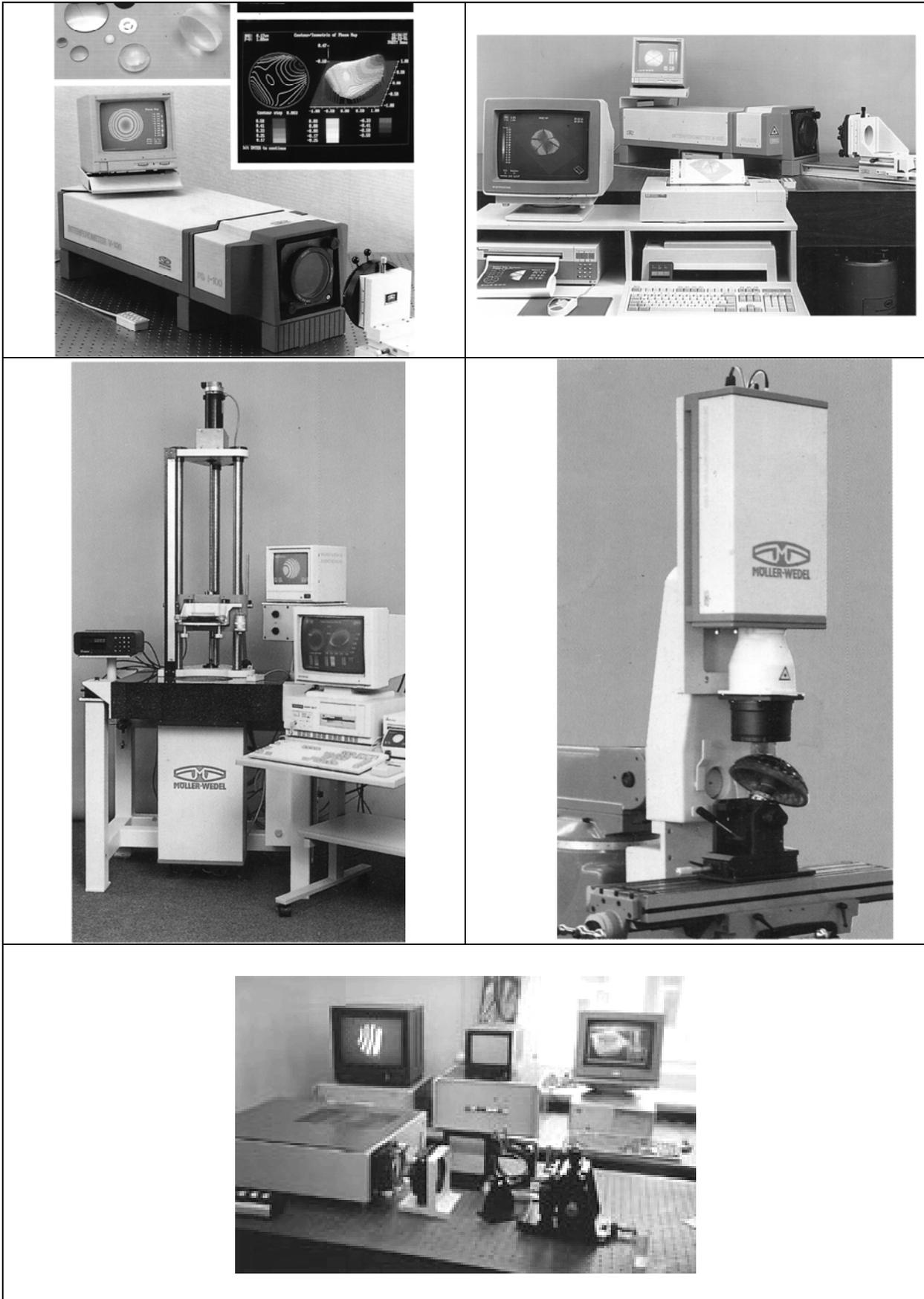


Рис. 17. Интерферограмма объектива Индустар-50

Низкая чувствительность к вибрациям принесла широкую популярность интерферометрам по схеме Физо при контроле оптических изделий средней точности.

В табл.2 показаны разновидности конструктивных решений интерферометра Физо для различных целей. Выпускаемые комплексы оснащены компьютерами, видеовыходом и дорогостоящим программным обеспечением. Однако их точностные возможности, как показано далее, ограничены необходимостью применения в их конструкции образцовых деталей, точность которых неизбежно ограничена и находится на уровне $\lambda/20$.

Таблица.2. Разновидности конструктивных решений интерферометра Физо (Фирма Möller-Wedel и ЛОМО)



ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Требования к точности образцовых элементов для классических и традиционных интерферометров

Разность хода δ лучей света с длиной волны λ для образцового волнового фронта и рабочего фронта, отраженного по нормали к исследуемой поверхности, составит:

$$\delta = 2 h. \quad (1)$$

Если разность хода кратна четному числу $\lambda/2$, то происходит усиление света согласно выражению

$$I = 2a^2 [1 + \cos(2\pi\delta / \lambda)], \quad (2)$$

где I – интенсивность в интерференционном изображении.

a - амплитуда напряженности электрического поля (считая, что она одинакова для интерферирующих фронтов).

Переходя к относительной интенсивности в интерференционной картине, получим :

$$I'' = \cos^2 (\pi W / \lambda). \quad (3)$$

Разность хода в волновой мере обозначим как :

$$\omega = \delta / \lambda. \quad (4)$$

Если одна волновая поверхность повернута относительно второй на угол θ , то пространственная частота интерференционных полос, вызванных наклоном, составит :

$$\nu = (\sin \theta) / \lambda. \quad (5)$$

При малых углах принимают

$$\sin \theta = \theta.$$

Тогда

$$\nu = \theta / \lambda. \quad (6)$$

и распределение относительной интенсивности в интерференционной картине при введении заклона поверхности можно описать выражением :

$$I'' = \cos^2 \pi (y + \omega) \quad (7)$$

где y – протяженность на оптической поверхности по нормали к ребру клина.

Выражение (7) описывает формирование картины интерференции двух взаимно заклоненных плоских или сферических волновых фронтов. Интерференционные полосы прямолинейны, параллельны и разделены равными промежутками, с косинусоидальным характером распределения интенсивности в интерференционной картине (в направлении по нормали к интерференционной полосе). Величина ω указывает фазовый сдвиг в периодической картине полос на участке, где имеется дополнительная разность хода, вызванная ошибкой исследуемой оптической поверхности, если образцовая поверхность ошибок не имеет.

Традиционные интерферометры (например, по схеме Физо или Тваймана - Грина, рис. 6, 18 [2]) характеризуются тем, что для формирования опорного волнового фронта в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (обычно – образцовой оптической поверхности, плоской или сферической).

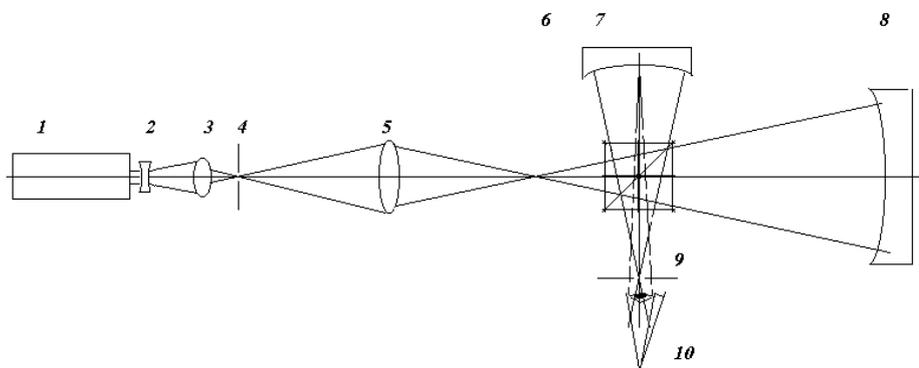


Рис. 18. Лазерный неравноплечий интерферометр со сферической образцовой поверхностью

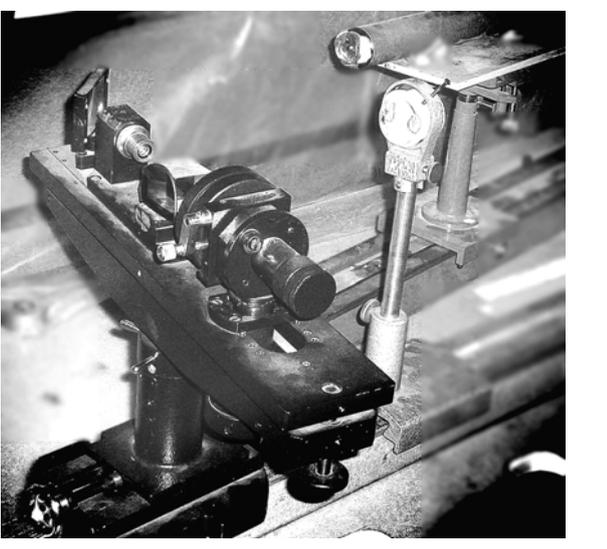
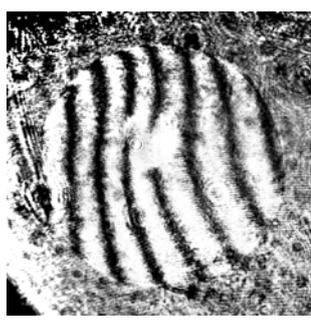
1- лазер, 2 -3 - объектив осветительной системы, 4 –осветительная диафрагма, 5 – микрообъектив осветительной системы, 6 – тест-объект –светящаяся точка, 7 –образцовая сферическая поверхность, 8 – исследуемая сферическая поверхность, 9 – светоделительный кубик, 10 – приемник изображения (например, глаз)

Такой элемент создает волновой фронт, который, содержит остаточные ошибки (деформации). Эти ошибки порождаются рядом причин, в числе которых – следующие.

- 1) Остаточные ошибки изготовления.

Применяемые традиционно методы обработки и контроля точных оптических поверхностей не позволяют гарантировать, что погрешности формы оптических поверхностей будут меньше, чем $\lambda/20$.

2) Возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали. Наличие таких изменений могут способствовать:

	
<p>Рис.19. Лазерный неравноплечий интерферометр – общий вид</p>	<p>Рис.20. Интерферограмма оптической поверхности (очковая линза)</p>

- а) динамические воздействия (например, пережатие в оправках);
- б) гравитационные воздействия (нарушение разгрузки детали);
- с) температурные воздействия;
- д) вибрационные воздействия.

Таким образом, на практике распределение интенсивности в интерференционной картине определяется выражением:

$$I'' = \cos^2 \pi (v\gamma + \omega + \omega_R). \quad (8)$$

Здесь ω_R - ошибка образцового волнового фронта.

Итак, точность интерференционного контроля, при соблюдений прочих условий, решающим образом определяется величиной ω_R .

В практике оптических измерений обычным является следующее метрологическое требование: погрешность средства измерения должна быть в 5 – 10 раз меньше измеряемой ошибки изделия. Отсюда мы можем определить типовые требования к точности измерений аберраций и ошибок оптических систем разных классов точности (Табл. 1).

Здесь ω_T - предельно допустимая ошибка образцового волнового фронта прибора для контроля образцовой поверхности интерферометра.

Можно считать, что значения требуемой точности в случае интерферометрии относятся, при соблюдении прочих условий (вакуум, устранение влияния вибраций и прочее), и к допустимым остаточным погрешностям образцового волнового фронта. Эти погрешности, в свою очередь, определяются ошибками образцовой оптической поверхности.

Таким образом, можно сформулировать требования к контролю образцовых элементов наивысшей точности для универсальных интерферометров (традиционных типов).

Требования к точности ω_T для устройства контроля эталонов показаны в табл.3. В связи с возможной нестабильностью образцового элемента интерферометра (эталона), его одноразовая аттестация к моменту продажи прибора заказчику не может считаться достаточной.

В действительности, для постоянного обеспечения и поддержания указанной точности в практике измерений (при исследовании оптических элементов и систем наивысшей точности) оперативный самоконтроль реального состояния опорного волнового фронта в момент каждого сеанса контроля становится необходимым.

Таблица 3

Тип оптической системы	Требования к точности системы	Требования к точности прибора контроля	ω_R	ω_T
Зрительная труба	0.25λ	(0.025 - 0.05) λ	0.032λ	0.0032 - 0.0064 λ
Исследовательский микроскоп	0.05λ	(0.005 - 0.01) λ	0.007λ	0.0007 - 0.0014 λ
Космический телескоп	0.03λ	(0.003 - 0.006) λ	0.0045λ	0.00045 - 0.0009 λ

Исследования [12] показали, что выполнение приведенных условий становится возможным в случае создания альтернативного интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом.

Чувствительность интерферометрических отсчетов

Интерферометры позволяют находить оптическую разность хода, возникающую при введении испытуемого образца в ход лучей. Наводка производится либо на светлые, либо на темные полосы. Порог

чувствительности оценивается минимальным приращением оптической разности хода, на которое реагирует прибор.

Рассмотрим основные причины, ограничивающие чувствительность традиционных интерферометров [9].

1. Конечные размеры источников света.
2. Ширина спектрального интервала.

Эти два фактора не действуют для современных лазерных интерферометров, где источником обычно служит дифракционный кружок, созданный фокусировкой параллельного строго монохроматического лазерного пучка, причем размеры источников света составляют единицы микрометров.

3. Неравенство интенсивности интерферирующих пучков и наличие рассеянного света приводит к понижению контраста интерференционной картины. При отношении интенсивностей двух интерферирующих пучков, равном 2,5, уменьшение контраста составляет 10%, что является вполне допустимым.
4. Ширина интерференционных полос. Чувствительность интерферометров мало зависит от ширины полос. Это связано с тем, что с увеличением ширины края полос становятся менее резкими, и относительная погрешность наводок практически не изменяется.
5. Методы наводок на интерференционную полосу в отраженном свете.

Визуальные методы:

- Совмещение перекрестия сетки с серединой интерференционной полосы при двухлучевой интерференции $K = 1/10 - 1/20 \lambda$.

- Нониальное совмещение при двойном изображении интерференционных полос в случае двухлучевой интерференции – $K = 1/10 - 1/20 \lambda$.

- Совмещение перекрестия сетки с интерференционной полосой при многолучевой интерференции (или при использовании изофотометрии интерферограммы) $K = 1/100 - 1/200 \lambda$.

Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом, не требующие применения образцовых оптических элементов

В ходе исследований методов контроля aberrаций и ошибок систем и деталей предельной точности, имеющих ошибки менее $0,1 \lambda$, выполнен ряд разработок интерферометров с дифракционным образцовым волновым фронтом [3, 8, 11, 12]. Исходным пунктом для поисков в этом направлении послужила известная схема интерферометра с совмещенным ходом лучей и дифракцией на точке, предложенная Линником [3] (рис. 21).

Тест-объект "светящаяся точка" 4 фокусируется исследуемой системой или деталью 6 в плоскость полупрозрачного покрытия 10 пластины 9, содержащего точечную диафрагму. Часть света, прошедшая полупрозрачное покрытие, распространяется в направлении наблюдательной системы в виде

рабочего сферического волнового фронта 12, искаженного абберациями и ошибками объекта исследования. Часть света, испытавшая дифракцию на точечной диафрагме в покрытии, распространяется в виде неискаженного сферического опорного волнового фронта 11. Результат интерференции рабочего и опорного волновых фронтов дает оптико-измерительное интерференционное изображение 13.

Хороший контраст интерферограммы достигается, когда интенсивность рабочего и опорного пучков близки по величине, что в данной схеме зависит не только от коэффициента пропускания покрытия (для измерения которого пришлось бы выполнять операцию замены пластинки и повторной настройки схемы), но и от положения изображения точечного тест-объекта (пятна рассеяния) относительно точечной диафрагмы. Кроме того, смещение пятна относительно диафрагмы более чем на половину диаметра пятна приводит к гашению опорного пучка лучей в интерферометре, что влечет за собой исчезновение интерференции.

Итак, достоинство рассмотренной классической схемы состоит в отсутствии образцовой оптической поверхности, а следовательно и ошибок ее изготовления. Другим преимуществом схемы является ее простота. Интерферометр, по существу, состоит из точечного тест-объекта и пластины с точечной диафрагмой в полупрозрачном покрытии.

Недостатки схемы Линника, на наш взгляд, следующие:

Поперечная расфокусировка интерферометра для получения прямых интерференционных полос, как рассмотрено, ограничена диаметром пятна рассеяния. Получаемые интерференционные картины имеют невысокое качество и зашумлены, что снижает точность измерений. Кроме того, настройка интерферометра Линника при исследовании каждого оптического элемента требует использования микро-подвижек с чувствительностью порядка 1 микрометра, что усложняет и удорожает практическую реализацию интерферометра.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИЕЙ НА ТОЧЕЧНОМ ОТВЕРСТИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОШИБОК ФОРМЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Итак, одним из наиболее распространенных методов исследования деформаций волнового фронта, в том числе связанных с ошибками формы прецизионных полированных поверхностей и абберациями фокусирующих оптических систем, является метод интерферометрии.

Современные требования оптического производства и исследований состоят в необходимости исследования ошибок и качества оптических систем и элементов, для которых вносимые деформации волнового фронта не должны превышать десятых, а иногда и сотых долей длины волны излучения. К оптике

такого класса относятся космические телескопы, высококачественные исследовательские микроскопы, оптические системы для технологий современной микроэлектроники.

Для технологического контроля при изготовлении таких систем к настоящему времени получили распространение интерферометрические автоматизированные комплексы на базе интерферометра по схеме Физо. Обладая достоинствами универсальности и малой виброчувствительности аппаратура такого типа, тем не менее, имеет важный недостаток – неустранимые остаточные ошибки опорного волнового фронта, связанные с ошибками формы образцовой оптической поверхности, которые возникают как на этапе изготовления, так и в процессе эксплуатации интерферометра.

Схемные решения традиционных интерферометров основаны на формировании опорного волнового фронта путем использования образцовых оптических поверхностей. К таким устройствам относятся ставшие классическими интерферометры Тваймана и Физо.

Известные достоинства таких схемных решений 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.

Недостатком классических интерферометров при контроле оптики наивысшего класса точности является необходимость присутствия в их схемах образцового оптического элемента, точность изготовления которого ограничена. При этом нет гарантии от неконтролируемого изменения точности образцового оптического элемента в процессе эксплуатации интерферометра.

Интерферометр Линника

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 [5] (рис. 2). За рубежом ее называют PDI (Point diffraction interferometer, то есть “интерферометр с дифракцией на точке”).

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.

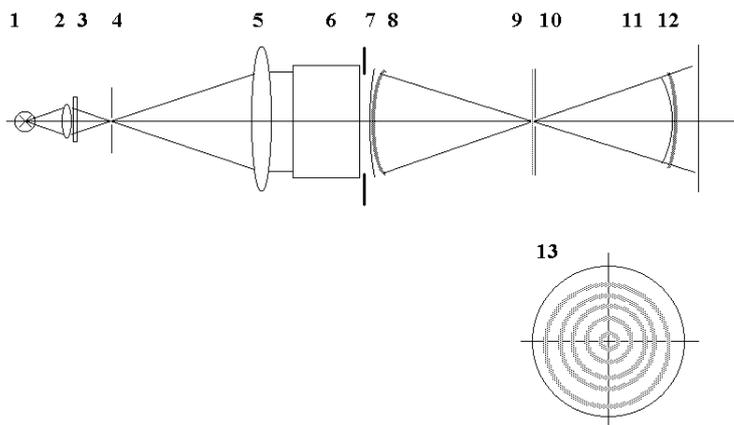


Рис. 21. 1 - лампа, 2 - конденсор, 3 - светофильтр, 4 - точечная диафрагма, 5- коллиматорный объектив, 6 - исследуемая оптическая система, 7 - выходной зрачок, 8 - волновой фронт, сформированный исследуемой системой, 9 - пластинка Линника, 10 - светоделительное покрытие с точечной диафрагмой, 11 - исследуемый искаженный волновой фронт, 12 - дифрагированный сферический опорный фронт

Неравноплечий дифракционный интерферометр

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и *разнесенными* ветвями [8, 12] (рис. 22, 27).

Разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом. 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).

Интерферометр, в общем случае, может работать без применения в его схеме точных и эталонных поверхностей.

Благодаря высокой когерентности лазерного излучения и его способности фокусироваться в пятно малых размеров, в интерферометре в качестве образцового используется сферический волновой фронт, образованный при

дифракции сходящихся пучков на отверстии диаметром порядка 1 - 10 мкм (рис. 22).

Разработанный прибор может быть использован для оценки погрешностей изготовления оптических поверхностей, качества объективов различного назначения, в том числе - объективов микроскопов.

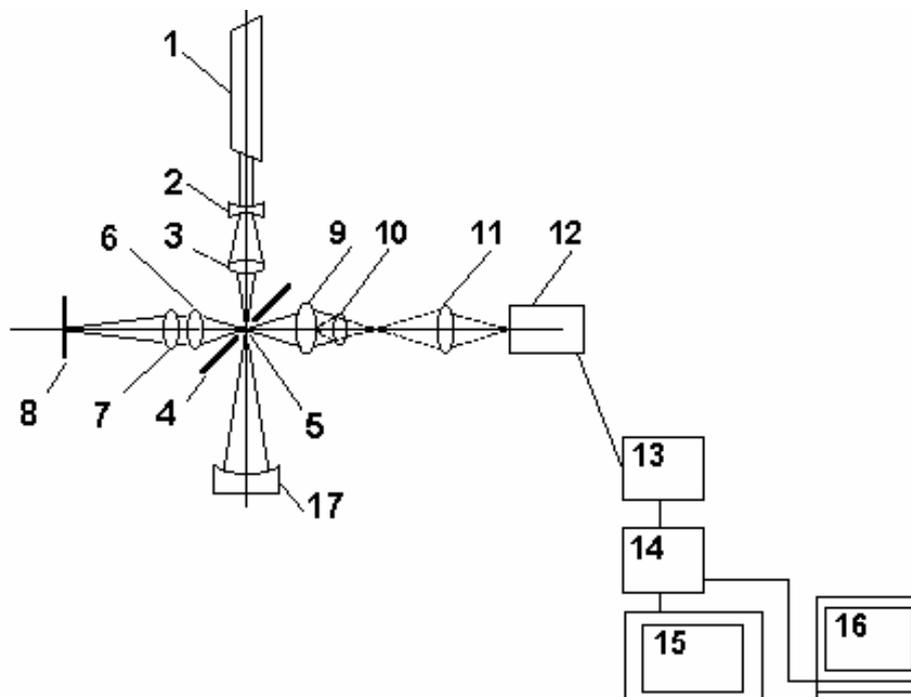


Рис. 22. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом.

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.

На одну из поверхностей светоделителя светового пучка, выполненного в виде плоскопараллельной пластины 4 , нанесено зеркальное покрытие (вместо светоделительного покрытия, используемого в неравноплечих интерферометрах). В центре зеркального покрытия 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.

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

Кроме того, за счет такого выполнения 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.

При этом интерферометр с дифракционной волной позволяет контролировать оптические элементы и поверхности, отличающиеся коэффициентом пропускания или отражения в большом диапазоне, от 1 до 90%, без замены элементов интерферометра. Решение подобной задачи в неравноплечем интерферометре требует замены неалюминированной эталонной сферической поверхности на алюминированную, что влечет за собой необходимость повторной настройки прибора.

Схема реализованного интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом показана на рис. 22. Луч лазера 1, пройдя отрицательный компонент 2, фокусируется объективом 3 в точечное отверстие 5 наклонного плоского зеркала 4. Отверстие совмещено с центром кривизны вогнутой сферической поверхности 15 исследуемой детали 16. В схему входит также автоколлимационная осветительная система, состоящая из элементов 6, 7 и 8.

В плече наблюдения имеются объектив 9 и окуляр 11 для наблюдения освещенной точечной диаграммы и автоколлимационного изображения точки в центре кривизны контролируемой поверхности. Для наблюдения интерференции в зрачке дополнительно вводится линза Бертрана 10. Для регистрации интерферограммы за окуляром устанавливается камера 12 с блоком обработки сигнала 13 и устройством отображения 14, регистрации и обработки результатов (компьютер).

Работает интерферометр следующим образом. Пучок лучей лазера фокусируется осветительной системой 2 - 3 на точечное отверстие в зеркальном покрытии наклонного плоского зеркала 4 в виде пятна рассеяния (обычно- дифракционного кружка) диаметром порядка 10 мкм. Точечное отверстие становится источником дифракционной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности фокусируется в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие, а чаще – смещенного относительно него для получения интерференционной картины прямолинейных полос.

Отразившись от зеркала, этот пучок через объектив 9 и окуляр 11 направляется на приемник изображения 12. Часть излучения лазера, сфокусированного осветительной системой 2 - 3 на точечное отверстие, но не прошедшего через него, отражается от зеркала в направлении осветительного сферического зеркала 8 и фокусируется им на отверстии в направлении плеча наблюдения 9, 10, 11.

При этом на отверстии формируется вторая дифракционная сферическая волна, фронт которой используется в качестве опорного. В результате сложения этой волны с рабочей, сформированной контролируемой поверхностью, возникает интерференционная в совмещенных световых пучках, распространяющихся от точечного отверстия в направлении приемника изображения.

Рассмотренный вариант схемы интерферометра в режиме контроля оптических поверхностей имеет примечательную особенность, состоящую в том, что данный интерферометр является полностью безэталоным, так как в нем не содержится ни одной образцовой оптической поверхности, а также отсутствуют поверхности, погрешности изготовления которых входят в погрешности измерения.

При наличии в схеме контроля значительных вибраций, а также при необходимости регулярной работы на интерферометре, используется компьютер с видеосистемой (8, 11, 12).

Для устранения влияния вибраций телевизионное изображение движущейся интерференционной картины записывают в видеопамять, а затем наблюдают и расшифровывают изображение неподвижной интерферограммы, воспроизводимое с одиночного кадра.

Имеется модификация данного интерферометра, позволяющая просто и эффективно реализовать режим фазового считывания интерферограммы, при котором точность отсчета может достигать 0,001 длины волны.

Применение автоматизированной обработки численных результатов контроля позволяет существенно расширить возможности всесторонней оценки исследуемых оптических систем и их элементов, повысить надежность контроля, что, в конечном итоге, способствует эффективности исследований и производства, повышению качества их результатов.

Относительно формы и структуры дифрагированного волнового фронта

Для обоснования возможности использования волнового фронта, дифрагированного на малом отверстии, в качестве образцовой поверхности, важно знать основные факторы, определяющие возможные искажения, а также понять механизм их влияния на поведение амплитуды и фазы в дифрагированной волне. Следует отметить тот факт, что корректное решение данного вопроса затрагивает сразу несколько дифракционных явлений:

- формирование распределения амплитуды и фазы светового поля в ближней зоне дифракции – так называемого ближнего поля,
- трансформация ближнего поля в поле средней и дальней зоны,
- характер распространения поля в дальней или радиационной зоне.

Описание взаимосвязи сформированного в плоскости апертуры зонда распределения поля с дальнепольной интенсивностью не зависит от параметров объекта, на котором произошла дифракция. Это обстоятельство используется в

данной работе для обоснования возможности наклона плоскости диафрагмы с точечным отверстием на угол 45 градусов без внесения искажений в дифрагированный волновой фронт.

Рассмотрим отверстие в тонком металлическом экране. В плоскости экрана с его тыльной стороны формируется рассеянное поле, источником которого является, во-первых, падающее на экран с фронтальной стороны излучение, а, во-вторых, наводимые токи, которые, в свою очередь, также создают переменное электромагнитное поле. В результате в среде в непосредственной близости к экрану возникает электромагнитное поле с пространственной структурой меньше длины волны падающего света. Это поле образует основную часть так называемого *ближнего* поля, состоящего из неоднородных плоских волн, которые быстро затухают в перпендикулярном к экрану направлении (см. с.62, п. 19).

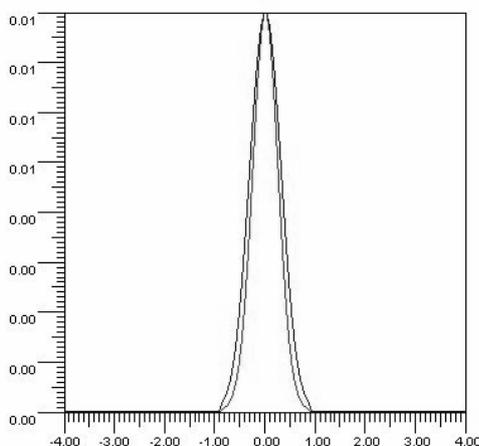


Рис. 23 Дальнеполюсное распределение интенсивности света, дифрагированного на отверстии диаметром 140 нм.

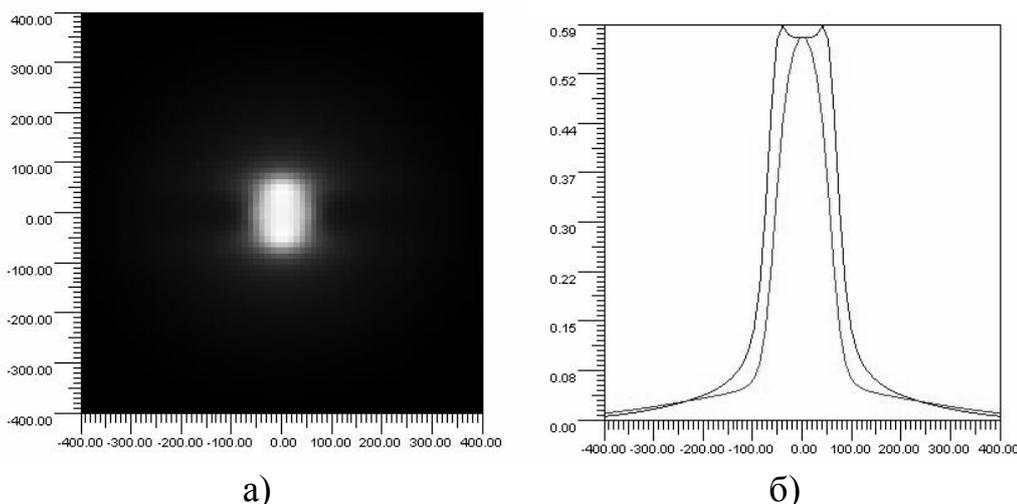


Рис. 24. Распределение интенсивности в ближнем поле: а) полутоновая картина, б) поперечное сечение в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Энергия *дальнего* поля распространяется соответственно, в дальнюю зону дифракции (на расстоянии более 1000λ), и регистрируется приемником. Из

сравнения различных экспериментальных данных с моделируемыми распределениями можно заключить, что увеличение проводимости, а также увеличение толщины экрана приводит к более равномерным дальнепольным распределениям интенсивности по угловым координатам. При ограничении проводимости или уменьшении толщины экрана становится доминирующей волна, распространяющаяся нормально от экрана, и очень быстро уменьшается доля излучения в других направлениях. Моделируемое угловое распределение интенсивности имеет максимум в центре при гауссовом законе распределения, не достигающем нулевого значения в пределах телесного угла $\pm 90^\circ$.

На рис. 1 – 2 показаны модельные дальнепольное и ближнепольное распределения интенсивности света при дифракции на апертуре диаметром 140 нм с учетом того, что экран имеет конечную проводимость. Направление линейной поляризации падающего поля подразумевается таким, что электрический вектор на рис. 2а направлен вертикально.

Как следует из рисунков, неоднородность интенсивности, являющаяся следствием неоднородности дифрагированного поля по амплитуде, достаточно велика и зависит как от направления поляризации света, так и от параметров стенок экрана, моделируемых проводимостью. Общий характер распределения дальнепольной интенсивности все время остается близким к гауссовой кривой. 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.

В отличие от неравномерности амплитуды, которая является следствием неравномерности индикатрисы излучения вторичного источника, формирующегося в области отверстия, 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 на основании выводов, изложенных в работе на с.62, п. 19, и справедливой на таких расстояниях от экрана, которые не менее чем на три порядка превышают размер отверстия:

$$\Delta w = d^2 / (\lambda s), \quad (9)$$

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

(peak-to-valley) 0.00013λ , а среднеквадратическая погрешность (RMS), соответственно, равна 0.00004λ . Соотношение 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:

$$\sin \theta = \lambda/d, \quad (10)$$

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 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. Этот эффект стабильно наблюдается при настройке интерферометра и показан на рис. 3.

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.

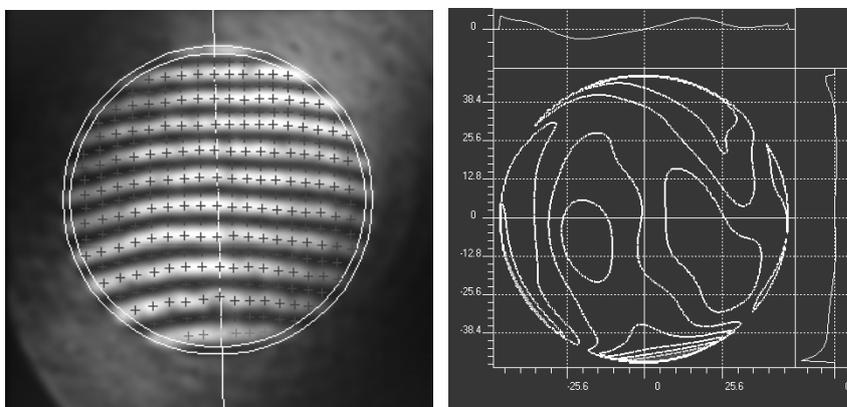


Рис. 25. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б).

а)

б)

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.

Прибор отличается отсутствием образцовых оптических элементов и ошибок их изготовления, конструктивная простота, малогабаритность и легкость в эксплуатации.

Основной недостаток данного устройства - сложность юстировки в процессе его изготовления. Другой недостаток, свойственный всем двухлучевым интерферометрам, состоит в ограниченной точности измерения координат интерференционных полос, что вызвано их нерезкостью вследствие синусоидального характера распределения интенсивности.

ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Рассмотрение традиционных методов исследования искажений волнового фронта, связанных с ошибками формы поверхности, на примере количественного теневого метода Фуко-Филбера, показывает, что для него действует линейная функция преобразования (ФП) как зависимость освещенности E_T в теневой картине от поперечной абберации $\delta l'$ (связанной с деформацией исследуемого волнового фронта) с коэффициентом пропорциональности k :

$$E_T = k \delta l'$$

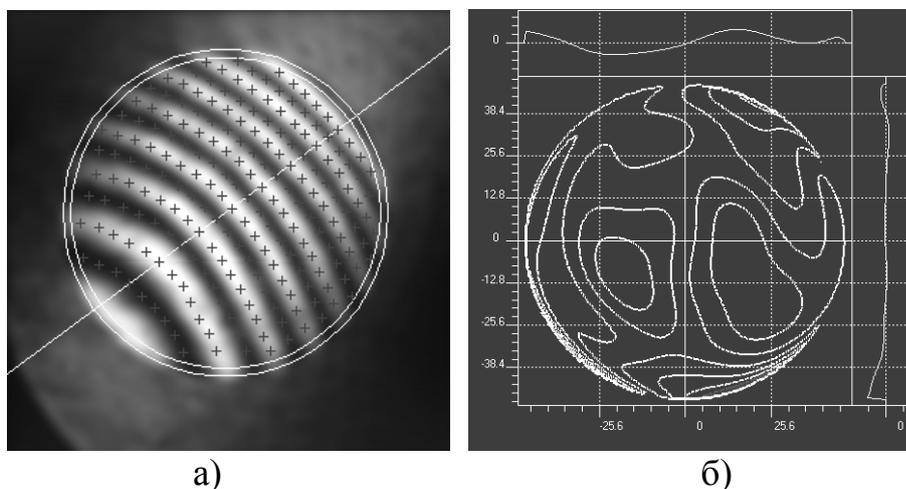


Рис. 26. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б). интерференционном изображении

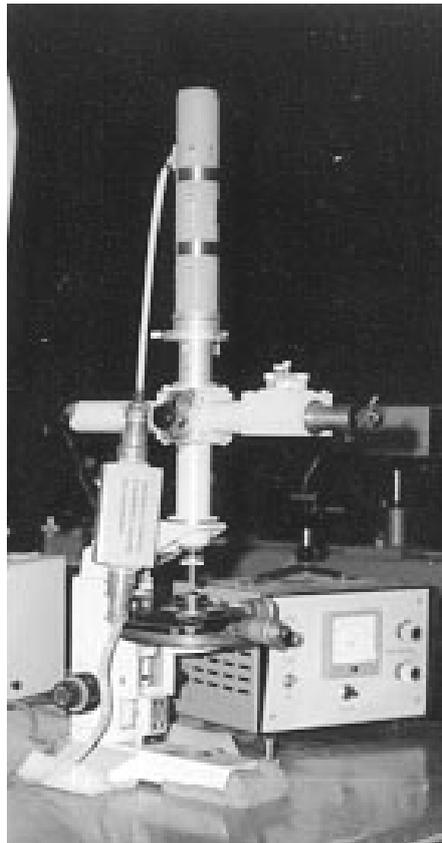


Рис. 27. Дифракционный интерферометр для исследования объективов микроскопов

С другой стороны, анализ ФП метода интерферометрии деформаций волнового фронта показывает, что относительная интенсивность в интерференционной картине \tilde{I} связана с искажениями волнового фронта ω (в волновой мере) периодической зависимостью (рис. 5):

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi\omega$$

Здесь $\tilde{I} = I_i / I_0$, где I_i - значение интенсивности в данной точке интерференционного изображения; I_0 - интенсивность в той же точке при отсутствии aberrации;

$$\omega = W / \lambda ;$$

где W - нормальное отклонение волнового фронта; λ - длина волны излучения в интерферометре.

Анализ показывает ряд преимуществ, создаваемых здесь периодической характеристикой чувствительности:

- 1) наглядное отображение карты ошибок волнового фронта, где интерференционные полосы играют роль изолиний;
- 2) количественный характер метода, где интерферограмма удобна для прямых геометрических измерений координат положения полос, связанных с исследуемыми ошибками волнового фронта.

При настройке интерферометра на режим "прямолинейных полос" вносится взаимный заклон образцового и рабочего волновых фронтов на угол θ , причем возникает несущая частота ν :

$$\nu = \frac{\sin \theta}{\lambda}$$

При этом ФП такого поперечно расфокусированного интерферометра принимает вид:

$$\tilde{I} = \cos^2 [\pi(\nu y + \omega)]$$

где y - пространственная координата.

Работу интерферометра в режиме поперечной расфокусировки удобно рассматривать, введя понятие двумерной ФП метода исследования прецизионных поверхностей. Введение в характеристику преобразования дополнительной координаты (здесь - заклон на угол θ) позволяет достичь качественного скачка, когда карта деформаций волнового фронта (как система изолиний - "горизонталей" карты деформаций с шагом дискретизации, равным или кратным длине световой волны) преобразуется в систему полос, соответствующих системе профилей поверхности ошибок исследуемого волнового фронта. Такой прием повышает наглядность интерферограммы, облегчает ее расшифровку и особенно важен, когда измеряемые ошибки меньше шага дискретизации, то есть меньше цены шага интерференционной полосы (то есть $\lambda/2$ или λ). В работе [13] дан анализ возможностей и ограничений методов и средств исследования прецизионных поверхностей. Недостатки плавных характеристик преобразования:

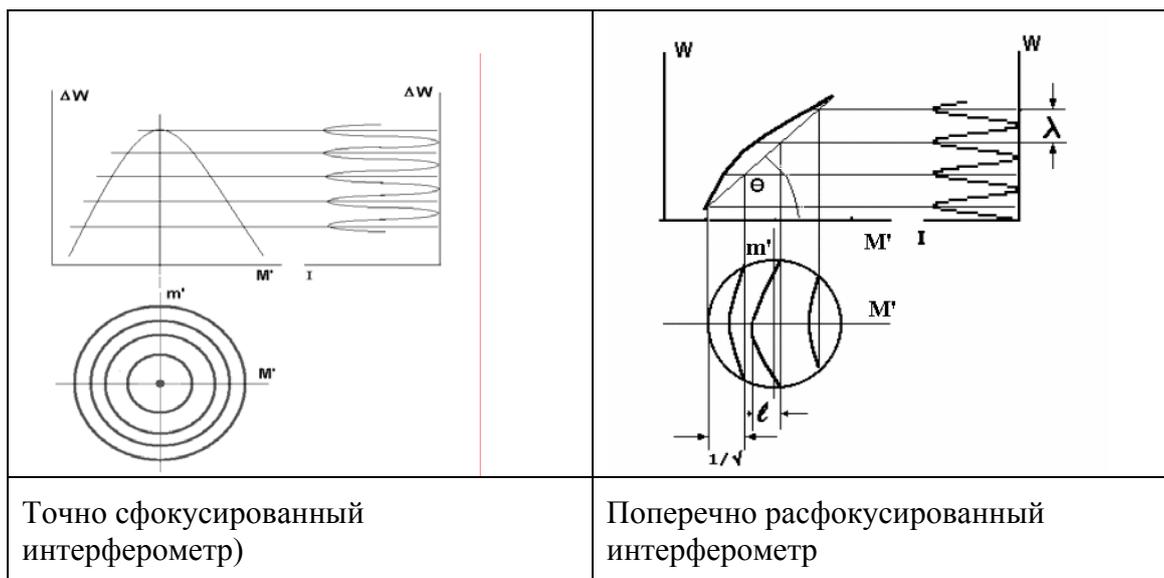


Рис. 28. Схема функционирования периодической функции преобразования

- ограниченный динамический диапазон, лежащий в рамках линейного участка ФП;
- низкая чувствительность визуальных измерительных наводок, связанная с нечеткостью элементов оптико-измерительного изображения (теневая картина, пятно рассеяния, пятна гартманогаммы);
- высокая избыточность информации при автоматизированной расшифровке и интерпретации таких оптико-измерительных изображений.

Для устранения выявленных недостатков и получения эффективных методов и средств исследования прецизионных поверхностей, обладающих новыми свойствами и расширенными возможностями дано развитие системы одномерных ФП [3]. Предложен ряд типовых ФП, которым присвоены условные названия, взятые в кавычки, по признаку внешней формы графика функции.

Поскольку рассматриваемые инвариантные зависимости могут связывать между собой в разных конкретных случаях разные величины, для всех ФП приняты единые значения функции и аргумента: $W_{y,z}$ - независимая переменная, соответствующая исследуемому двумерному параметру; $I_{y',z'}$ - зависимая переменная, соответствующая двумерному распределению интенсивности в оптико-измерительном изображении.

В частности, в принятый ряд базовых ФП внесены:

- ФП типа "клин", соответствующая плавной функции преобразования метода исследования:

$$I = W \operatorname{tg} \alpha,$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ - градиент;

- периодическая ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа "синусоида":

$$I = 1 + \cos(2\pi W / \lambda_w);$$

- ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа "импульс", которая может быть наглядно представлена выражением с участием δ -функции:

$$I = \delta(W) = \lim N \exp(-N^2 \pi W^2),$$

$$\text{или } I(W) = I_{\max} \quad \text{при } W = 0$$

$$I(W) = 0 \quad \text{при } W \neq 0;$$

- периодическая ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа "гребенка", которая может быть наглядно представлена выражением:

$$I_{y,z} = \operatorname{comb}(W / \lambda_w) = \sum_{n=1}^N \delta(W - n\lambda_w)$$

где $\lambda_w \leq W \leq n \lambda_w$,

или, на практике:

$$I(W) = I_{max} \text{ при } W/\lambda_w = 0,1,2,3,\dots$$

$$I(W) = 0 \text{ при } W/\lambda_w \neq 0,1,2,3,\dots$$

Анализ показал, что разработанная система ФП дает ряд специальных положительных эффектов, таких как сокращение избыточности информации, улучшение наглядности и выявление новых деталей и свойств объекта, повышение чувствительности контроля и точности измерений, повышение оперативности и производительности, упрощение задачи автоматизации контроля и исследований.

Взаимовлияние синтезируемых методов исследования прецизионных поверхностей с достижением новых результатов и свойств иллюстрируется также на примере предложенного (и реализованного в виде серийного прибора) метода изометрии второй производной функции пространственного распределения интенсивности, позволяющего, например, выделять центры (оси) интерференционных полос. Эта разработка дала возможность создать автоматизированный интерферометр нового типа, позволяющий повысить точность расшифровки интерферограмм в 10 - 40 раз в реальном времени.

Операция электронного выделения и визуализации центров интерференционных полос (рис.6) с умножением частоты полос осуществлена согласно ФП вида:

$$I_{ok} = \text{comb} \left[\frac{1}{\lambda} (y \sin \theta + kW) \right],$$

где I_{ok} - относительная интенсивность в оконтуренной интерферограмме; θ - угол наклона образцового волнового фронта интерферометра относительно рабочего волнового фронта; W - волновая абберация; y - координата в интерферограмме, ориентированная по нормали к направлению интерференционной полосы; k - коэффициент умножения полос.

Если $k=2$, то при этом цена шага интерференционной полосы составляет $\lambda/4$, что создает эффект интерферометрии с использованием излучения, имеющего $\lambda \approx 300$ нм.

Точность определения координат интерференционных полос возрастает, как показали исследования, в 40 раз по сравнению с точностью измерения необработанной интерферограммы, что соответствует возможности визуального обнаружения деформации волнового фронта на уровне $\lambda/200$ в реальном времени.

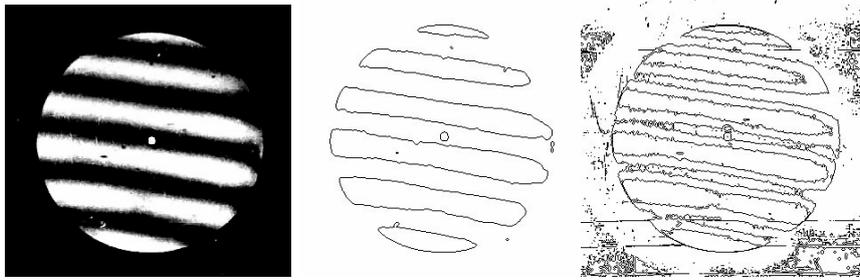


Рис. 29. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос

Точностные характеристики прибора исследования прецизионных поверхностей зависят от принципа и конструкции измерительного преобразователя и могут быть определены при анализе функции преобразования.

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.

Испытания и аттестация реализованных приборов не выявили погрешностей, которые превышали бы значения $0,02\lambda$. Практика работы дифракционных интерферометров с созданным в данной работе телевизионным аналоговым анализатором интерферограмм (ТАИ-1) показала возможность обнаружения и оценки ошибок волнового фронта на уровне $0,005\lambda$ в реальном времени в интерактивном режиме.

Анализ погрешностей метода интерферометрии

Испытания и аттестация реализованных дифракционных интерферометров не выявили погрешностей, которые превышали бы значения $0,02 \lambda$. Практика работы дифракционных интерферометров с обработкой интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос (например, при помощи анализатора интерферограмм ТАИ-1) показала возможность обнаружения и оценки ошибок волнового фронта на уровне $0,005 \lambda$ в реальном времени в интерактивном режиме.

Сферические вогнутые поверхности могут контролироваться таким прибором с точностью лучше $0,01$ длины волны.

Для контроля асферических поверхностей предусмотрены два способа. Первый: использование анаберрационных схем контроля с применением технологических зеркал, изготовленных под данный интерферометр. Второй: применение коррекционного объектива, также изготовленного и аттестованного под данный интерферометр.

Анализ источников погрешностей метода интерферометрии на основе разработанной модели дифракционной интерферометрии показал, что погрешность измерения ошибки рефракции оптических систем и элементов методом интерферометрии определяется погрешностью измерения координаты границы элемента интерферограммы, но эта граница является нерезкой. Следовательно, для увеличения точности метода интерферометрии, необходимо увеличение градиента пограничной зоны границы интерференционного изображения в зрачке исследуемой оптической системы.

Распределение интенсивности интерферограммы формируется в два этапа:

I этап - формирование оптического изображения интерферограммы в зоне выходного зрачка исследуемой оптической системы.

II этап - формирование интерференционного изображения на чувствительной площадке приемника изображения.

Функция распределения интенсивности в этом изображении формируется как *свертка* ряда функций

Из литературы и практики хорошо известен недостаток метода интерферометрии, состоящий в существенной нерезкости края интерференционной полосы которое можно описать функцией $I_{ИНТ}$. Для анализа причин и разработки путей устранения этого недостатка традиционных методик, мы рассматриваем здесь источники указанной нерезкости.

С учетом влияния $I_{ФРТ П}$ - функции рассеяния точки приемником изображения, структура края полосы интерференционного изображения, сформированного на поверхности чувствительной площадки приемника, описывается операцией свертки:

$$I_{\Sigma 1} = I_{ИНТ} \otimes I_{ФРТ П}$$

Далее, с учетом влияния функции рассеяния точки для оптической системы $I_{ФРТ(\Gamma)}$, которая определяется, главным образом, ее аберрациями и

дифракцией на зрачке, можем записать:

$$I_{\Sigma 2} = I_{\Sigma 1} \otimes I_{ФРТ(\Gamma)}.$$

Рассмотрение источников погрешностей метода показало, что одной из основных является погрешность считывания координат элементов картины. Причиной неопределенности в процессе совмещения измерительной марки с заданным элементом теневой картины является нерезкость элементов интерферограммы.

Показано, что среднеквадратическая погрешность σ_n наведения измерительной марки на край не вполне резкого элемента изображения зависит

от величины максимального пограничного градиента g_{max} в этом изображении и связана с ней практически обратно пропорциональной зависимостью.

Предлагается, наряду с рассмотренными способами повышения резкости интерферограммы, также способ повышения резкости, основанный на трансформации структуры изображения (рис. 42 - 47).

Метод основан на дискретизации пограничной зоны интерференционной полосы что, в результате, дает эффект выделения контура изображения как его изофоты. Выделение изофоты изображения достигается путем использования приемника изображения, имеющего световую характеристику импульсной формы.

Пограничная зона интерферограммы при трансформации изображения, характеризуемого применением импульсной функции преобразования, сама приобретает импульсный характер распределения интенсивности; происходит оконтуривание края тени с выделением изофоты. При этом резко возрастают пограничные градиенты в полученном изображении.

В процессе такой трансформации изображения выделение изофоты осуществляется программно в ходе цифровой (компьютерной) обработки массива данных, описывающих теневую картину. При макетировании и отладке метода использован образец PDI – интерферометра, оснащенный электронным анализатором интерферограммы ТАИ, а также компьютер с программным пакетом Adobe Photoshop, в котором присутствует опция выделения контура обрабатываемого изображения.

Немногочисленные местные мелкоструктурные искажения контурной пограничной линии связаны с местными дефектами полученного оптического изображения и остаточными шумами системы отображения и обработки изображения. Исследованиями и практикой проведения измерений здесь выявлено, что такие местные искажения не сказываются на точности и достоверности измерений.

Экспериментальная отладка и испытания метода показали, что проводимая изофотометрия интерференционной картины позволяет дополнительно повысить точность считывания координаты края интерферограммы в 8-12 раз.

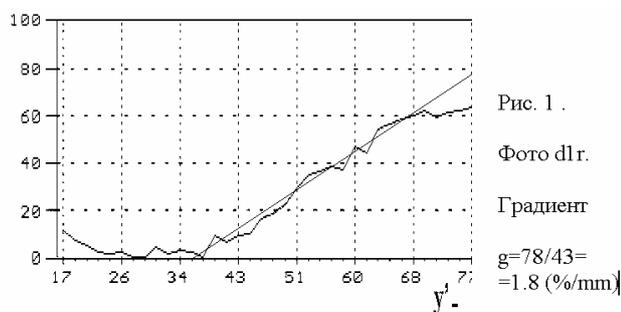


Рис. 1 .

Фото d1r.

Градиент

$$g = 78 / 43 = 1.8 \text{ (\%/mm)}$$

Рис. 30-а'

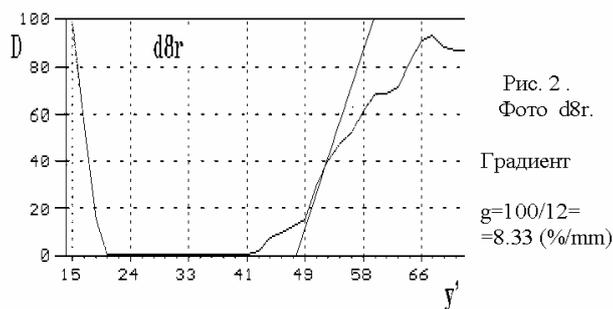


Рис. 30-б'

Показано полученное таким способом изображение интерферограммы. Как видно из рисунка, плавная пограничная зона преобразована в четкую штриховую линию.

Наблюдаемые местные отклонения формы штрихового края объясняются наличием шумов изображения. Сопоставление ширины пограничной зоны на исходном фотоснимке и ширины штриха на трансформированном изображении показывает, что в результате операции оконтуривания наблюдаемая ширина пограничной зоны интерферограммы, полученного с применением разработанных здесь оптических средств повышения резкости изображения, уменьшается не менее, чем в 8 раз для локального участка пограничной зоны.

Влияние шума вдоль штриховой границы полосы несколько снижает этот результат. За счет шумовых разбросов область локализации границы штрихом возрастает с 0,1 мм (для данной разрешающей способности сканирования) до 0,4 мм по максимальным шумовым разбросам. Наиболее объективной характеристикой такой штриховой границы можно считать величину среднего квадратического отклонения координаты границы. Дан анализ этой величины в цифровом изображении оконтуренной границы.

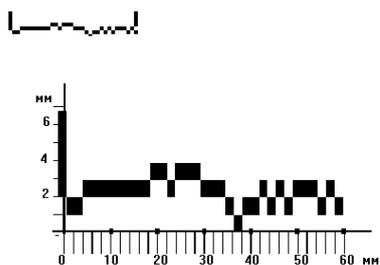


Рис. 31 Влияние шума вдоль штриховой границы полосы

Статистическая обработка дала следующие результаты:

$$\sigma_{z'} = \pm 0,087 \text{ мм},$$

где $\sigma_{z'}$ - среднее квадратическое отклонение координаты границы.

Таким образом, можно считать, что под влиянием шумов штриховая граница расширяется в 2 раза. Итак, с учетом шумов изображения, точность

локализации координаты границы в результате оконтуривания пограничной зоны в интерферограмме (рис. 32). возрастает не менее, чем в 4 раза.

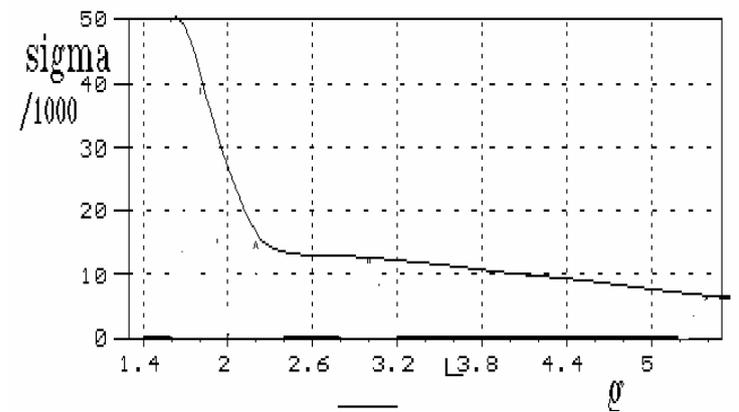


Рис. 32. Экспериментальная зависимость среднеквадратической погрешности наведения на границу интерферограммы от уровня градиента

Достигнутый результат, на наш взгляд, является достаточно убедительным, т.к. во многих областях исследований повышение точности, например, в 2 раза служит серьезным достижением.

Получена экспериментальная зависимость среднеквадратической погрешности наведения на границу интерферограммы от уровня градиента.

ВЫСОКОТОЧНАЯ ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Рассмотрим интерферограммы волновых фронтов, отраженных от оптических поверхностей различного качества. Интерферограммы получены на дифракционном интерферометре [8, 12], где в качестве референтного (эталонного) волнового фронта используется волна, дифрагированная на отверстии с диаметром, сравнимым с размерами максимума первого порядка (дискон Эри) дифракционного кружка. Схема подобного интерферометра показана на рис. 22, общий вид разработанного и собранного образца – на рис. 27. С целью восстановления фазы волнового фронта и топографии поверхности используется коммерческая программа обработки интерферограмм ZEBRA MathOPTIX [3], разработанная на кафедре Прикладной и компьютерной оптики, а также программное обеспечение обработки интерферограмм, созданное на кафедре Компьютерных технологий.

Программа ZEBRA MathOPTIX обладает целым набором математических и сервисных возможностей, предоставляемых пользователю в соответствии с принятыми в мире стандартами индустриально используемых

интерферометров. В этом смысле выходная информация, которая формируется в программе ZEBRA MathOPTIX, аналогична программному обеспечению интерферометров таких ведущих фирм, как Zygo, Veeco и Möller-Wedel. Авторами-разработчиками программы ZEBRA MathOPTIX являются сотрудники кафедры Прикладной и компьютерной оптики В.М.Домненко и Д.А.Гаврилин.

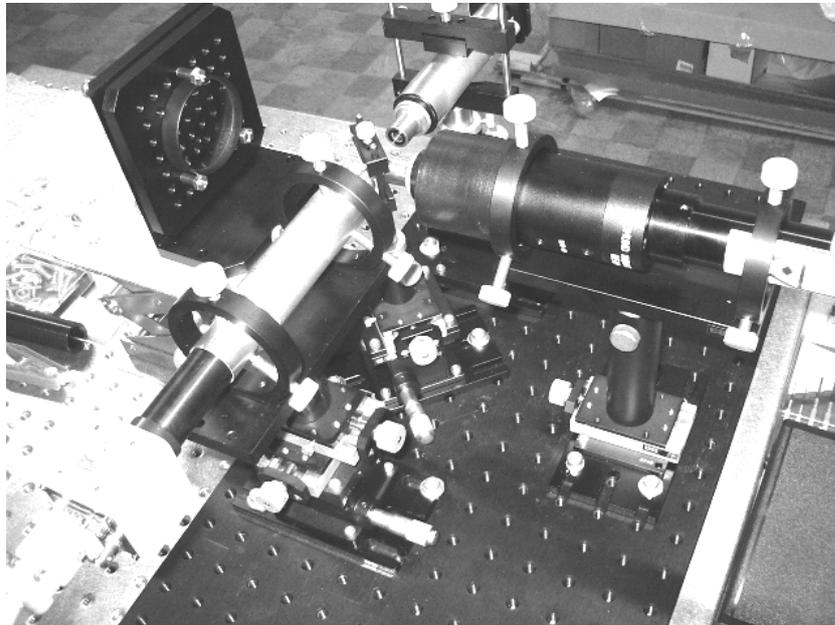


Рис. 33. Общий вид экспериментального PDI-интерферометра, построенного на базе серийных узлов производства фирм Meller-Wedel и ЛОМО

Обработка интерферограмм производится в несколько этапов, что иллюстрируется представленными ниже изображениями. В предварительную обработку входят, наряду со служебными процедурами, этап неглубокой пространственной фильтрации для удаления «мусора» из интерферограммы и этап идентификации полос – расстановка точек вдоль полос с определением возможного порядка базиса аппроксимации контролируемого волнового фронта или поверхности. Дальнейшая обработка основывается на серии математических методов интерпретации функций, целью которых является получение достоверного разложения отклонения волнового фронта или поверхности по полиномам Цернике. При этом определяются такие важные величины, как размах (peak-to-valley) и среднеквадратическое отклонение (RMS) в микрометрах или количестве рабочих длин волн.

Использование этой программы для обработки интерферограмм, полученных в интерферометре с дифракционной волной сравнения (PDI-интерферометре), представляет особый интерес, так как, в отличие от всех известных интерферометров, информация об отклонении исследуемых волновых фронтов или поверхностей здесь является абсолютной, а не относительной. Это вызвано следующими обстоятельствами. Недостатком

классических интерферометров при контроле оптики наивысшего класса точности является необходимость присутствия в их схемах образцового оптического элемента, точность изготовления которого ограничена уровнем порядка $1/20$ длины волны, причем нет гарантии от неконтролируемого изменения этой величины в процессе эксплуатации интерферометра.

Итак, основное достоинство предлагаемого лазерного интерферометра с дифрагированным опорным фронтом состоит в принципиальном отсутствии деформаций опорного волнового фронта при одновременном сохранении эксплуатационных возможностей, таких же как и у классических (традиционных) интерферометров, подобных неравноплечему интерферометру по схеме Тваймана-Грина.

Принцип действия рассматриваемого дифракционного интерферометра основан на использовании физического явления дифракции на малом отверстии, который может быть сравнительно просто и безусловно надежно воспроизведен в любых условиях и любом количестве приборов. Таким образом, мы имеем нуль-интерферометр, который не требует образцовых оптических элементов и в то же время служит источником сферической опорной волны при контроле оптических поверхностей и систем наивысшей точности, в том числе - для контроля образцовых элементов традиционных интерферометров. Данный интерферометр позволяет применять приемы работы, известные для традиционных интерферометров, а также различные средства повышения точности измерительных отсчетов. При этом 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.

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.

Экспериментальные результаты, показанные на рисунках, относятся двум различным уровням качества исследуемых поверхностей линз.

Первый случай (рис. 34, a-d) – это случай контроля поверхности с достаточно малым отклонением от сферичности, то есть поверхности высокого качества. Интерферограмма получена на интерферометре с дифракционной волной сравнения, дополнительное достоинство которого состоит в том, что все

пучки лучей фильтруются при прохождении через дифрагирующее точечное отверстие, и поэтому интерференционное изображение отличается высоким качеством, чистотой и отсутствием шумов. Это обстоятельство способствует тому, что работа всех этапов программы ZEBRA MathOPTIX происходит четко (рис.4) и обеспечивает высокую надежность опознавания и измерения координат интерференционных полос, стабильную повторяемость выходных числовых величин, что является гарантией адекватности и точности конечных результатов контроля.

Второй случай – в качестве модели выбрана вогнутая поверхность очковой линзы, обладающая достаточно большими отклонениями от сферичности. При этом на интерферограмме не удастся получить настолько малое количество полос, чтобы процедура поиска максимумов или минимумов полос могла уверенно идентифицировать все полосы, как это происходит в случае поверхности более высокого качества. Между тем, подобный случай может оказаться весьма важным в практике интерферометрического контроля оптики.

Несмотря на большие отклонения исследуемой поверхности от сферичности, их необходимо определить с не менее высокой точностью, чем в первом случае.

Такая задача возникает, например, при контроле асферики с отступлениями 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.

Остаются и другие проблемы, в частности, проблема качества проекционной оптической системы. Кроме того, увеличение числа данных в аппроксимационных задачах, как известно, приводит к обратному эффекту в смысле получения еще более сглаженной картины и увеличения степени неопределенности компонент высшего порядка в полиномиальном разложении (это касается не только степенного базиса, но и полиномов Цернике). Имеется в

виду, что интерпретационный путь решения задачи восстановления профиля сложной формы в принципе не подходит для контроля асферик высшего порядка.

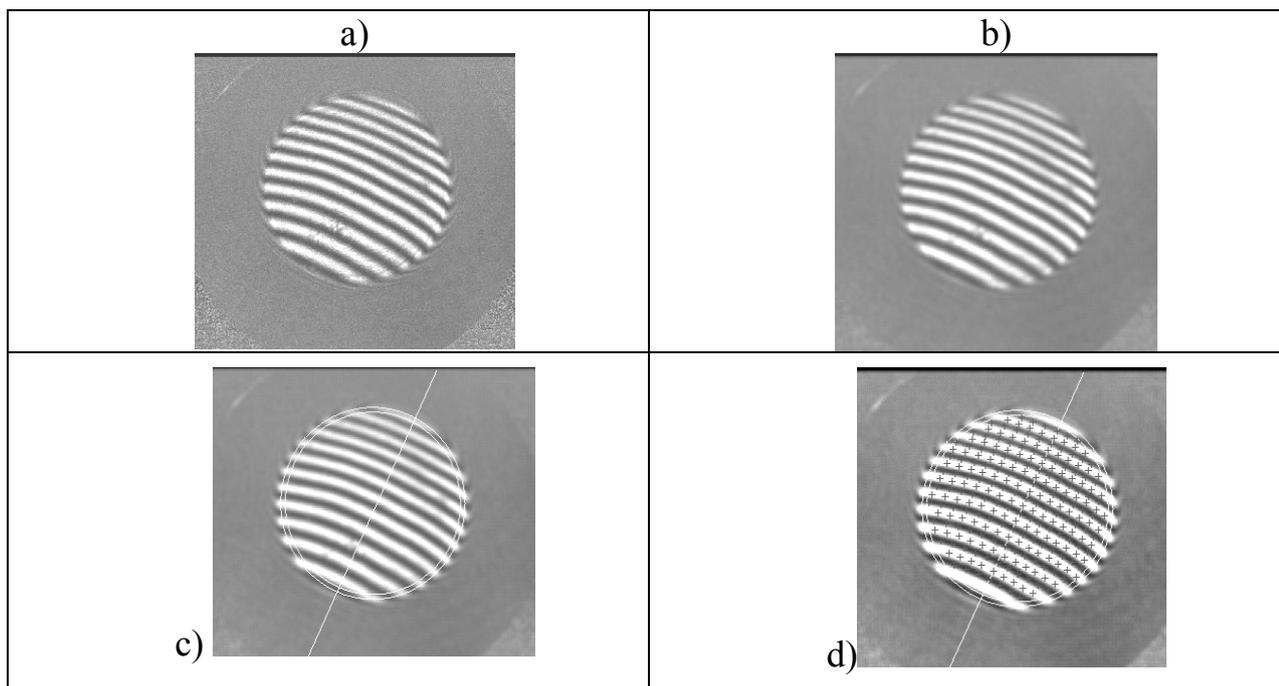


Рис. 34. Высокая надежность распознавания полос на интерферограммах обычной конфигурации

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕРА С ДИФРАГИРОВАННЫМ ОПОРНЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

Как видно из прилагаемого списка литературы, лазерный безэталонный интерферометр с опорным волновым фронтом, сформированным путем дифракции лазерного пучка, сфокусированного на микронном отверстии, был предложен и запатентован под руководством и при ведущем участии автора (Авторское свидетельство N 655188,1978). Активная работа по исследованию и развитию данного уникального технического решения продолжалась все прошедшие годы с привлечением различных творческих коллективов и изложена в 22 научных трудах.

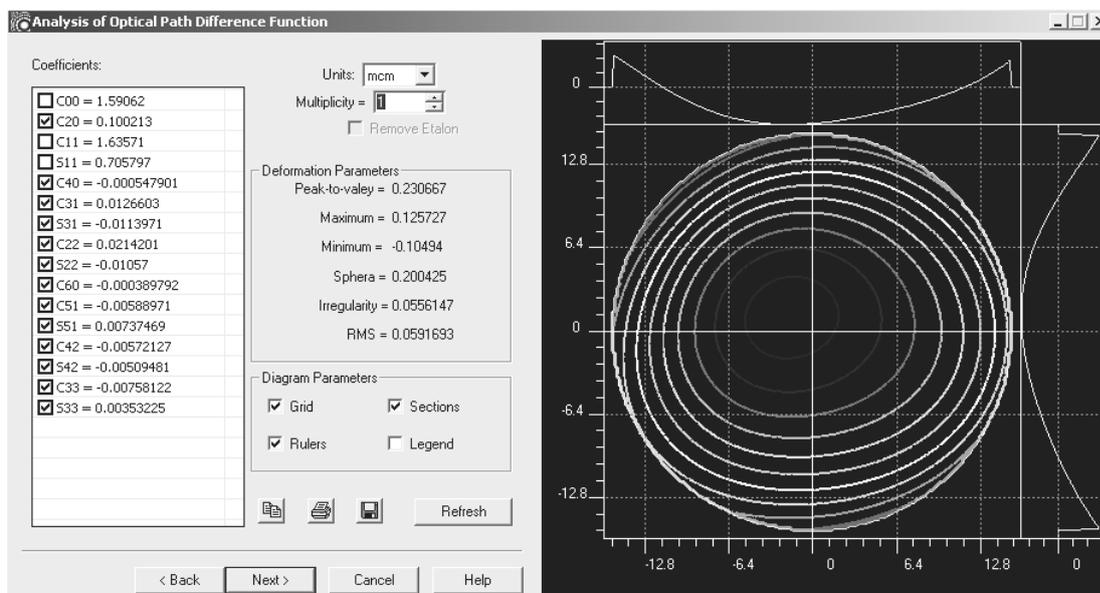


Рис. 35. Карта и профили деформаций волнового фронта по данным традиционной интерферометрии

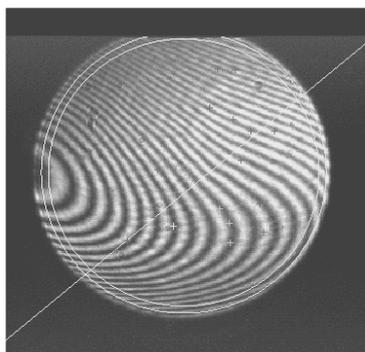


Рис. 36. Сложная интерферограмма как модель для отладки нового поколения программного обеспечения расшифровки

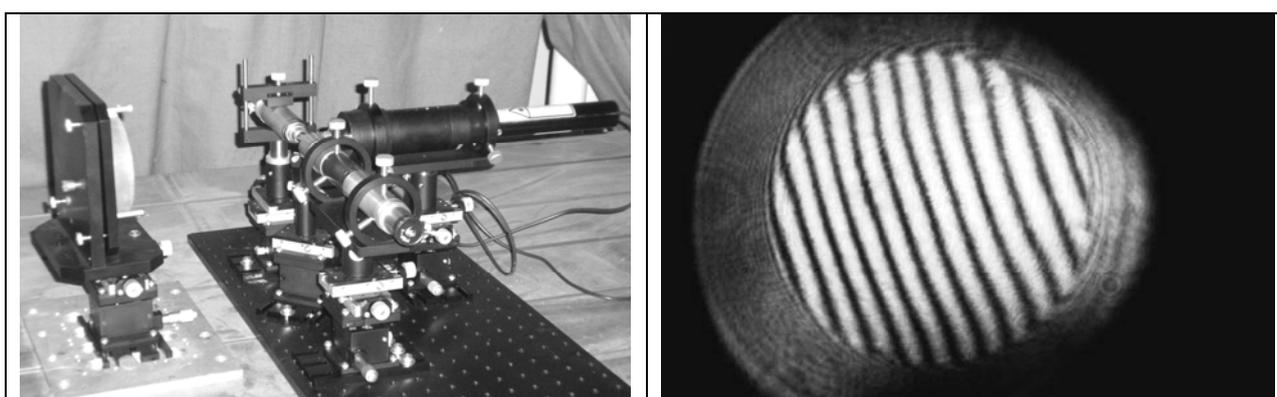


Рис. 37. Установка исследования прецизионного сферического зеркала на основе PDI-интерферометра на виброизолирующем интерференционном столе

В настоящее время происходит бум в области исследований и разработок в направлении дифракционной интерферометрии. Это выражается в явном

увеличении числа публикаций в зарубежных изданиях, расширении числа исследователей, связавших себя с развитием данной тематики. Ведущие зарубежные фирмы изучают, заимствуют и даже патентуют созданные нами решения.

Причиной такого повышения научно-технической активности в данном направлении можно считать появление новых научно-технических направлений, требующих применения ведущих достижений интерферометрии, так как возможности традиционных методов и интерферометрических схем оказались недостаточными для решения вновь возникающих задач высоких технологий, таких как современная нанолитография, космическое телескопостроение, современная прецизионная исследовательская микроскопия.

На рис. 27, 33, 37 показаны образцы различных конструктивных решений дифракционного интерферометра, созданные в разные годы и для различных целей. В их числе – интерферометр для исследования прецизионной оптики микроскопов, применение которого обеспечило создание нового комплекта объективов для современных микроскопов (выпускаемых ныне в России и в Китае). На макете рассмотренного интерферометра проводились исследования опытных образцов микрообъективов ОА-6,3 Л, ОПХ-10 Л, ОПХ--25 Л, ОПХ-40 Л, ОПХ-100 Л и ОА-63 ЛБ, которыми комплектуются опытные образцы люминесцентных микроскопов ЛЮМАМ. Эта работа продемонстрировала широкие возможности прибора, в частности его способность контролировать микрообъективы с большим диапазоном увеличения при минимальном времени перенастройки.

На рис. 33 и 37 представлен образец интерферометра, созданный для решения задач современной нанолитографии В.К.Кирилловским и Н.Б.Вознесенским на базе узлов, серийно выпускаемых фирмами Edmund и ОАО ЛОМО.

Более совершенная конструкция (рис 38), разработана по техническому заданию В.К.Кирилловского инженером В.А.Удаловым для технологического контроля и аттестации прецизионных оптических систем космических телескопов в условиях производства.

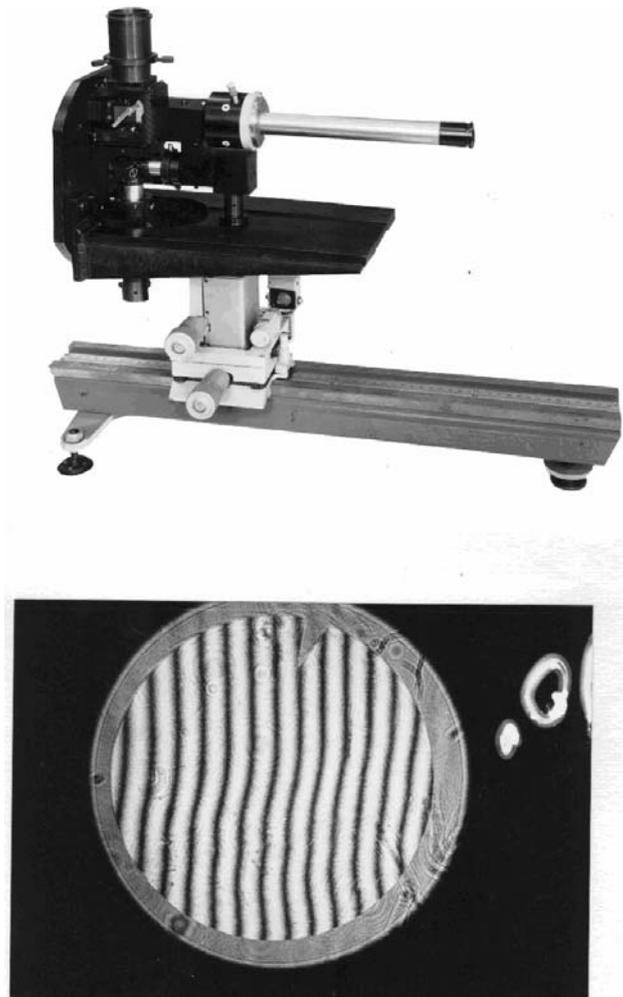


Рис.38. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом. Обращает на себя внимание высокое качество интерферограммы.

УНИФИЦИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОЙ АСТРООПТИКИ

В процессе дальнейшей работы был создан вариант безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом - ПК-881.

Ниже приводится его техническое описание, инструкция по эксплуатации, а также результаты исследований первого образца данного прибора.

Назначение

Интерферометр предназначен для контроля и аттестации формы вогнутых поверхностей оптических деталей и aberrации оптических систем в автоколлимации от плоских к зеркал, а также погрешностей формы оптических поверхностей контрольных зеркал. Прибор предназначен для работы в термостатированном помещении при температуре окружающей среды $+10, \pm 0.5$ °С и относительной влажности воздуха не более 80% при нормальном атмосферном давлении.

Устройство и работа интерферометра

Принцип действия и оптическая система

Принцип действия интерферометра аналогичен рассмотренному его прототипу. Схема интерферометра показана на рис.39.

Таблица 4.

Технические данные

Предельная погрешность	инструментальная	$\lambda/100$.
Апертура проверяемых поверхностей		не более 0.25
Числовая апертура осветительных объективов		0.2
Числовая апертура объектива наблюдательной системы		0.3
Пределы перемещения интерференционной головки по 3-м осям, мм		± 10
Приемник изображения		фотокамера «Зенит – Е» и цифровая фотокамера
Источник света		Лазер ЛГ – 52 – 1
Длина волны излучения, мкм		0.6328
Габариты, мм		735×400×590
Масса, кг		16

Луч от источника когерентного излучения 1 попадает на систему плоских зеркал 2. Пройдя расширитель и объектив 3, он фокусируется в точечное отверстие 4 зеркала 5. Отверстие совмещено с центром кривизны контролируемой волновой поверхности 6. Фокус коллиматорного объектива 7 автоколлимационного осветительного плеча 8, 9 совмещен с точечным отверстием на зеркале 5. Фокус линзы 8 совмещен с автоколлимационным осветительным зеркалом 9. В плече наблюдения имеется объектив 10 с ирисовой диафрагмой, согласующая линза 12 и окуляр 14 для наблюдения интерференции в зрачке. Для наблюдения освещенной точечной диафрагмы 4 в ее автоколлимационного изображения в центре кривизны контролируемой поверхности 6, вводится дополнительно линза Бертрана 13. В двух ветвях интерферометра установлены с возможностью поворота поляризационные пластины 15, 16. Для регистрации интерферограммы за проекционной линзой 17 устанавливается фотокамера 18.

Интерферометр работает следующим образом.

Пучок лучей источника 1, прошедший через расширительный элемент, фокусируется на точечном отверстии в зеркальном покрытии наклонного плоского зеркала 5 в виде пятна рассеяния диаметром около 4 мкм. Точечное отверстие становится источником дифрагированной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой поверхности 6 изображается в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие. Отразившись от зеркала 5, эта рабочая волна направляется на приемник изображения (глаз, фотопленка) через объектив 10.

Часть излучения источника, сфокусированного объективом 3 на точечное отверстие, но не прошедшее через него, отражается в зеркале 5 в направлении осветительного плоского зеркала 9, отражается от него и фокусируется объективом 7 на отверстие 4 зеркала 5. На отверстии 4 формируется вторая диафрагмированная сферическая волна, фронт которой используется в качестве опорного. В результате сложения этой волны с рабочей возникает интерференция в совмещенных световых пучках, распространяющихся в направлении объектива 10, который, формирует выходной зрачок в плоскости изображения 20. В качестве фоторегистратора используется фотокамера "Зенит-Е" без объектива. Работа в этом режиме идет при выключенном зеркале 11. Интерференционная картина формируется в плоскости фотопленки 13.

Основание 1 интерферометра имеет 3 ножки с регулировкой по высоте.

На направляющую основания устанавливается с возможностью продольного перемещения подвижная каретка 2 со стойкой трубчатой конструкции. На стойке смонтирована система из двух неподвижных и одного подвижного зеркала, предназначенная для увеличения пучка лазерного излучения и направления его в схему интерферометра.

Плоское зеркало с точечным отверстием монтируется в оправе, имеющей следующие подвижки: повороты вокруг оси наблюдательной ветви на угол 5° от плоскости, лежащей под углом 45° к оси осветительной ветви, поступательные перемещения в плоскости расположения зеркала по двум взаимоперпендикулярным направлениям на расстояние 3 мм с помощью микроподвижек 3, поступательные перемещения перпендикулярно поверхности зеркала в точке о помощью винта 4.

Механическая конструкция интерферометра обеспечивает максимальную жесткость для предотвращения влияния вибраций.

Объектив осветительной системы обеспечивает фокусировку лазерного излучения рукояткой 5 на осевую точку зеркала с апертурой 0,2.

Автоколлимационный осветитель 6 отъюстирован соосно с осветительной системой 7,

Примечание. В зависимости от того, какая контролируется поверхность (алюминированная, без покрытий или просветленная) производится замена узла автоколлимационного осветительного зеркала 25 на узел с

непросветленной или просветленной плоскими пластинками, входящими в комплекс интерферометра. При этом (при необходимости), наблюдая в окуляр 16, следует подправить освещение винтами 26 и (или) фокусирующей автоколлимацион.осв.объектива с помощью рукоятки 27.

Наблюдательная система 8 отъюстирована соосно с автоколлимационным осветителем.

Объектив наблюдательной системы имеет фокусирующую подвижку 9 вдоль оси 3 мм, максимальную апертуру 0,3 и ирисовую диафрагму.

Зеркало 10 выполнено выключаящимся. Плоскость изображения совмещена с фокальной плоскостью фотокамеры 10.

В конструкции интерферометра предусматривается использование стыкуемого с ним приемника изображения из универсального комплекса обработки изображений - цифровой телевизионной системы, разрабатываемой на ЛОМО. Этот комплекс осуществляет первичную обработку оптического изображения (интерферограммы) и преобразует его в цифровой массив данных, удобный для дальнейшего ввода его в ЭВМ с целью получения на выходе числовых абберационных характеристик исследуемой оптической системы, а также выработки другой необходимой информации, например управляющих команд для последующего этапа обработки оптической поверхности или сборки и юстировки всей оптической системы или ее составных частей.

Порядок установки и подготовка к работе

Интерферометр должен быть установлен в помещении с минимальными вибрациями на общем фундаменте с проверяемой системой.

Необходимо устранить воздушные потоки в зоне измерений, в особенности между интерферометром и проверяемой системой.

При работе на интерферометре в помещении необходимо выключить яркий свет. Помещение должно быть термостатировано.

Методика работы на интерферометре

Установить интерферометр перед исследуемой системой на расстоянии, равном ее радиусу кривизны. Установить в удобном месте лазер ЛГ-52-1 и включить его. (Примечание. Порядок работы с лазером ЛГ-52-1 изложен в его техническом описании). Направить луч в центральную зону зеркала 12. Предварительно грубыми (вручную) и плавными разворотами этого зеркала с помощью регуляторов 13 направить луч в центр отверстия 14. Перекрыть отверстие 10 кусочком папиросной бумаги, затем, пользуясь регуляторами 13, добиться попадания луча в центр этого отверстия. Убрать бумагу с отверстия. Включить линзу Бертрана рукояткой 16. Включить диагональное зеркало рукояткой 17. Наблюдая в окуляр 18, добиться максимального освещения точечного отверстия в зеркальном препарате. При

необходимости сфокусировать изображение точки поворотом рукоятки 16) вокруг своей оси.

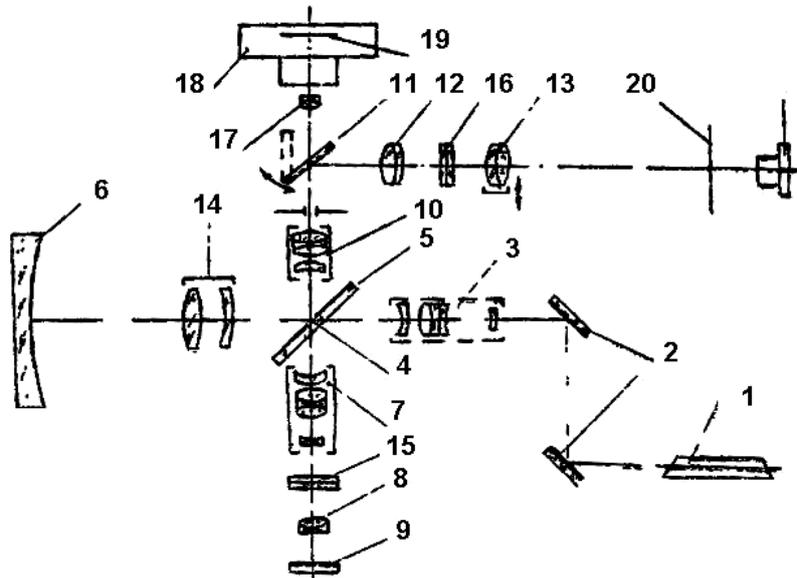


Рис. 39. Схема безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом - ПК-881

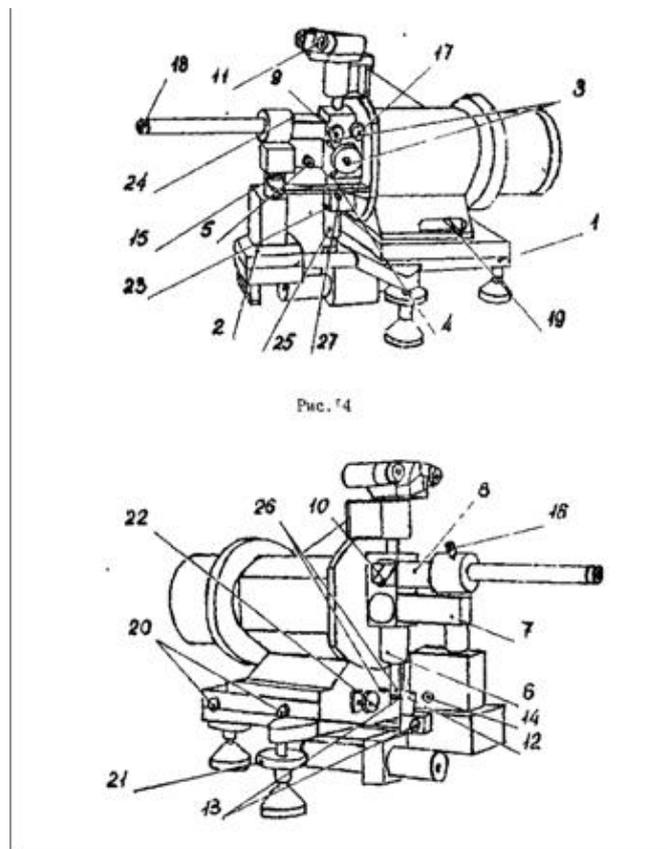


Рис. 40. Конструктивное решение безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом - ПК-881

С помощью матового стекла или листка бумаги найти автоколлимационное изображение точки, построенное проверяемой системой. (Это удобно сделать, подсвечивая со стороны окуляра вспомогательным источником света: лампочкой или лазером).

Освободить стопор 19.

Последовательно, грубыми и точными перемещениями головки интерферометра поперек оптической оси винтами 20 и вращением одного из зубчатых колес 21, привести автоколлимационный блик на зеркало с дифракционной точкой.

Наблюдая в окуляр, добиться минимальных размеров пятна рассеяния перемещением головки интерферометра вдоль оптической оси винтом 22.

Включить линзу Бертрана. При этом в поле зрения окуляра должна наблюдаться интерференционная картина. Вращением ручки 9 сфокусироваться на резкую границу зрачка.

Разворотами поляризаторов 23 и 24 добиться максимального контраста.

(Примечание. Контраст интерференционной картины существенно зависит от используемого лазера и от его модового состава излучения. При плохом контрасте нужно вывести лазер на одномодовый режим или заменить его вовсе).

Перестройка числа и ориентации полос достигается винтами 20 и колесами 21.

При наблюдении интерференционных колец число последних меняют винтом 22.

Фотографирование интерференционных картин выполняется по следующей методике.

Зарядить фотоаппарат "Зенит - Е" пленкой типа "А-2" .

Выключить диагональное зеркало рукояткой 17. Глядя в видоискатель фотоаппарата, наблюдать интерференционную картину. При необходимости поворотом ручки 9 добиться резкого изображения краев выходного зрачка.

Установить вблизи лазера центральный фотозатвор с тросиком так, чтобы луч попадал в лепестки затвора.

Регулятор выдержек фотоаппарата "Зенит - Е" установить в положение "3". Взвести затвор, нажатием кнопки открыть его и зафиксировать в этом положении.

С момента последнего касания интерферометра или фотоаппарата выдержать паузу 3 - 5 с, затем выполнить экспонирование центральным затвором (выдержка определяется опытным путем).

Закрывать затвор фотоаппарата. Интерферометр готов к последующей работе.

Примечание. В условиях вибрации или изменения контраста рекомендуется съемку каждого сюжета выполнять 3 раза с целью повышения вероятности получения качественного негатива.

Обрабатывать пленку следует в проявителе УП - 2. Время проявления 3 мин.

После обработки негативы подвергаются фотографическому оконтуриванию.

Расшифровка снимков проводится визуально с помощью микроскопа БМИ-1Ц или с помощью специально разработанных методов на ЭВМ.

При исследовании, испытаниях и аттестации опытных образцов интерферометра, а также на первых этапах исследований контролируемых зеркал и в процессе проверки воспроизводимости результатов при отработке электронных блоков автоматизированной обработки данных интерферометрии полезно применение фоторегистрации интерферограмм с последующим оконтуриванием по приведенной методике, вошедшей в комплект документации ПК-881.

Методика оконтуривания интерферограмм.

1. Негатив интерферограммы контактно отпечатать на куске пленки типа ФТ-СК (на копировальном станке контактной печати ФТ-СК стеклянной пластиной толщиной не менее 8 мм. Выдержка определяется опытным путем.

2. Отпечаток на пленке ФТ-СК обработать, проявитель УП-2, время проявления 5 мин. температура 20°C, ополаскивание, затем Фиксирование - 20 мин, промывка - 20 мин, высушивание.

3. После высушивания отпечаток аналогичным способом отпечатать на куске пленки ФТ-СК.

4. Обработать второй отпечаток по следующему режиму. проявления 3 мин, 20°C (УП-2), промывка 3 мин. (проточная вода), засветка при равномерном освещении 7-12 сек (30 лк, белый свет), второе проявление 4 мин, 20°C (УП-2), фиксирование 20 мин, промывка 20 мин. (проточная вода), высушивание.

После обработки получается оконтуренный негатив интерферограммы.

Оконтуренный негатив контактно отпечатать на пленке ФТ-СК и обработать в обычном режиме (см. п. 2).

6. Оконтуренный отпечаток подвергается расшифровке на соответствующем измерительном приборе.

Методика метрологической аттестации интерферометра ПК-881-00.000

Этапы аттестации.

Аттестация прибора включает следующие операции:

- аттестация точечной диафрагмы разделительного зеркала;
- аттестация интерферометра путем регистрации интерферограмм пробного стекла.

Аттестация точечной диафрагмы а) зарегистрировать сечение пучка, дифрагированного на точечном препарате. Для этого в плоскости оправы точечного препарата интерферометра, обращенной к точке, поместить отрезок фотопленки (тип КИ-1) и открыванием предварительно перекрытого лазерного пучка выполнить экспонирование. Длительность экспозиции подбирается опытным путем для получения картины сечения пучка, содержащей дифракционный минимум (темное кольцо).

Допускается прямое измерение диаметра пучка, спроецированного на матовый экран.

б) измерить радиус R темного кольца на фотоснимке. Найти из чертежей на ПК-881 расстояние L , от точки препарата до плоскости установки пленки. Найти апертурный угол (рад) расходящегося пучка за точечной диафрагмой из выражения

$$\operatorname{tg} \nu = R / L$$

в) найти апертурный угол σ' (рад) объектива 3 осветительной системы из выражения: $u' = \sin \sigma'$,

где u' - расчетная апертура объектива.

г) найти диаметр точечной диафрагмы по формуле:

$$d_T = \frac{1.22 \lambda}{\nu - \delta}$$

д) точечная диафрагма считается удовлетворительной, если соблюдается условие $d_T \leq 0.5d_{oc}$;

d_{oc} – диаметр пятна рассеяния осветительного объектива.

Примечание:

Допускается определение размера точечной диафрагмы измерением с помощью микроскопа.

Аттестация интерферометра

Осуществляется путем фотографирования ряда интерферограмм

вогнутого, имеющего местную ошибку пробного стекла, при его поворотах относительно оптической оси интерферометра через 22.5° (5 положений от 0° до 90°) и через 90° (от 90° до 180°).

Повороты картины ошибок указывают на их принадлежность пробному стеклу. Если картина ошибок остается неподвижной, они принадлежат системам интерферометра.

Расшифровка ошибок производится на оконтуренных отпечатках интерферграмм. Разделение вращающейся и неподвижной составляющих функции деформации волнового фронта осуществляется по специальной программе методом наименьших квадратов, сквозной аппроксимацией всех снимков вращающимся и неподвижным базисом полиномов.

Выделение сферических аберрации ПК-381 осуществляется контролем того же пробного стекла на неравноплечем интерферометре в сравнении результатов. Сферические аберрации эталонного зеркала считаются малыми.

Ожидаемая погрешность интерферометра не превышает 0.01λ , где $\lambda = 0.6328$ мкм.

После юстировки прибора была проведена его аттестация по приведенной методике,

В процессе проведения исследований первого образца рассмотренного интерферометра был выявлен ряд несовершенств конструкции и связанных с ними трудностей, возникающих в процессе работы на нем. Это послужило толчком к разработке более совершенных моделей приборов, работающих по тому же принципу. В ходе продолжения работы предусматривается изготовление и исследование новых макетов, и цеховых приборов, работающих в едином комплексе со средствами телевизионной техники, автоматизации обработки, преобразования и расшифровки изображения с использованием последних достижений в области цифровой и вычислительной техники.

История создания безэталонного неравноплечевого лазерного интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом

Историю создания и развития данного интерферометра удобно проследить пользуясь списком литературы, опубликованной в процессе его разработки и реализации.

Литература по истории создания безэталонного неравноплечевого лазерного интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом

1. Авторское свидетельство изобретение "Лазерный интерферометр". Королев Н.В., Кирилловский В.К., Головкин П.В., Иванова Т.А., Рагузин Р.М. N 655188, 1978.

2. Методы контроля оптики микроскопов. (Аналитический обзор N 2450. ЦНИИИнформации, М.1980.
3. Кирилловский В.К. Применение лазеров при контроле оптики в условиях производства. Материалы 6 научно.- технической . конференции 26-28.11.80. "Использование лазеров в современной науке и технике", ЛДНТП, Л. 1980.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение .Л.1984. 265 с.
5. Кирилловский В.К. "Опыт применения интерферометрии для контроля микрооптики. Наглядное пособие. ЛДНТП, Л.1982. 10с.
6. Иванова Т.А., Кирилловский В.К., Исследование и контроль объективов микроскопов. Учебное пособие. ЛИТМО. 1983.
7. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Контроль и аттестация оптических систем с применением источников когерентного излучения. (Аналитический обзор N 3585). ЦНИИИнформации, М.1985.
8. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р., Удалов В.В., Валов Н.И., Иванова Т.А. Лазерный интерферометр для контроля оптических поверхностей “ Авторское свидетельство на изобретение. N1380393. 1985.
9. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. "Контроль оптических систем с применением лазеров". Учебное пособие. Л. ЛИТМО. 1987.
10. Кирилловский В.К., Артамонов Д.Д. Приборы и оборудование для контроля изделий оптического производства. Оптические приборы и товары народного потребления. Приложение к журналу ОМП N3, 1990 .
11. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. "Дифракционные интерферометры". Л. ЛИТМО.1990.
12. V.K.Kirillovsky. Diffraction Reference Wavefront Laser Interferometer. SPIE-The International Society for Optical Engineering.Proceed. "Miniature and Microoptics:Fabrication and System Applications II.20. Jul.1992,SanDiego, Calif,Volume 5 , 1751,p.p.197-200.
13. Кирилловский В.К., Анализ и синтез методов и средств контроля оптических систем с дифракционно ограниченным с качеством изображения . Автореферат докторской диссертации. 1998 г.
14. Кирилловский В.К., Кузнецов Д.Н. Оптимизация лазерного интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом на основе использования лазерных пучков гауссовой структуры. Сборник “Международная конференция. "Прикладная оптика-98", ГОИ-ИТМО СПб,16-18 декабря 1998.
15. Кирилловский В.К., Кузнецов Д.Н. , Трухин М.М. Интерферометр с дифрагированным фронтом сравнения для контроля прецизионных оптических поверхностей. Международная конференция "Прикладная оптика 98", ГОИ, ИТМО,СПб, 16-18 декабря 1998.
16. Кирилловский В.К., Лазерный интерферометр с дифрагированным опорным фронтом. Российская научно - практическая конференция ОПТИКА - ФПЦ "ИНТЕГРАЦИЯ". - XXX научно-техническая конференция профессорско-

преподавательского состава ИТМО(ТУ). Санкт-Петербург, 25-27 января 1999 года.

17. Кирилловский В.К., Лазерный интерферометр с дифрагированным опорным фронтом. Российская научно - практическая конференция ОПТИКА - ФПЦ "ИНТЕГРАЦИЯ". - XXX научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава ИТМО(ТУ). Санкт-Петербург, 25-27 января 1999 года.
18. В.К.Кирилловский. Модифицированный лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом. Статья. Конференция ППС, СПб ГИТМО ТУ, 2000 г.
19. Кирилловский В.К., Вознесенский Н.Б. Высокоапертурный дифракционный интерферометр с унифицированным опорным фронтом. Статья. Международный оптический конгресс "Оптика-XXI век", 16-20 октября 2000 г. Санкт-Петербург.
20. В.К.Кирилловский. Изучение принципов современной прецизионной интерферометрии на примере дифракционных интерферометров. Статья. Международный оптический конгресс "Оптика-XXI век", 16-20 октября 2000 г. Санкт-Петербург.
21. Kyeong-Hee Lee, N.B.Voznesensky, V.K.Kirillovsky. Principle of certification of high precision optical parts and systems based on diffraction interferometer. Proceedings of The First Scientific Workshop-Presentation "Optical Micro- and Nanotechnologies (OmaN-1)". 17-18 June 2002, St.-Petersburg, RUSSIA.
22. Кирилловский В.К., Гвоздев С.С., Маларев В.А.
Принципы контроля ошибок формы полированных поверхностей.
Оптические методы исследования стереометрии и внутренних дефектов элементной базы микроэлектроники. Сборник научных трудов ученых ИТМО. СПб. ИТМО. 2002г.
23. Кирилловский В.К., Гвоздев С.С., Особенности оптической диагностики характеристик поверхностей микросборок. (Статья). В Сборнике научных статей . "Оптические методы исследования дефектов и дефектообразования элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники , СПб. ГИТМО (ТУ). 2002г.
24. Кирилловский В.К., Вознесенский Н.Б.. Ли Кенг Хи Оптический измерительный комплекс на базе лазерного дифракционного интерферометра. XXXII научная и учебно методическая конференция посвященная 300- летию Санкт- Петербурга, 4 - 7 февраля 2003, СПб.
25. V.K.Kirillovsky. N.B.Voznesensky, M.M.Trouchine. The interferometer with diffraction on dot aperture for testing of the shape errors of precise surfaces. The Third International Symposium "Intensive Laser Actions and Technological Application" (Plata-III), SPIE (USA), IFMO (Russia), KERI(Korea), June 29 - July 3, St.Petersburg-Pushkin, 2003.

СТРУКТУРА ИНТЕНСИВНОСТИ ДИФРАГИРОВАННОГО ОПОРНОГО ФРОНТА

Источник дифрагированного опорного фронта – это отверстие в тонком металлическом экране. В плоскости тонкого экрана с его тыльной стороны формируется рассеянное поле, источником которого является, во-первых, падающее на экран с фронтальной стороны излучение, а, во-вторых, наводимые токи, которые, в свою очередь, также создают переменное электромагнитное поле.

В результате в среде в непосредственной близости к экрану возникает электромагнитное поле с пространственной структурой мельче длины волны падающего света. Это поле образует основную часть так называемого ближнего поля, состоящего из неоднородных плоских волн, которые быстро затухают в перпендикулярном к экрану направлении [1].

Энергия дальнего поля распространяется как сферический волновой фронт [6], соответственно, в дальнюю зону дифракции и регистрируется приемником. Из сравнения различных экспериментальных данных с моделируемыми распределениями можно заключить, что увеличение проводимости, а также увеличение толщины экрана приводит к более равномерным дальнепольным распределениям интенсивности по угловым координатам.

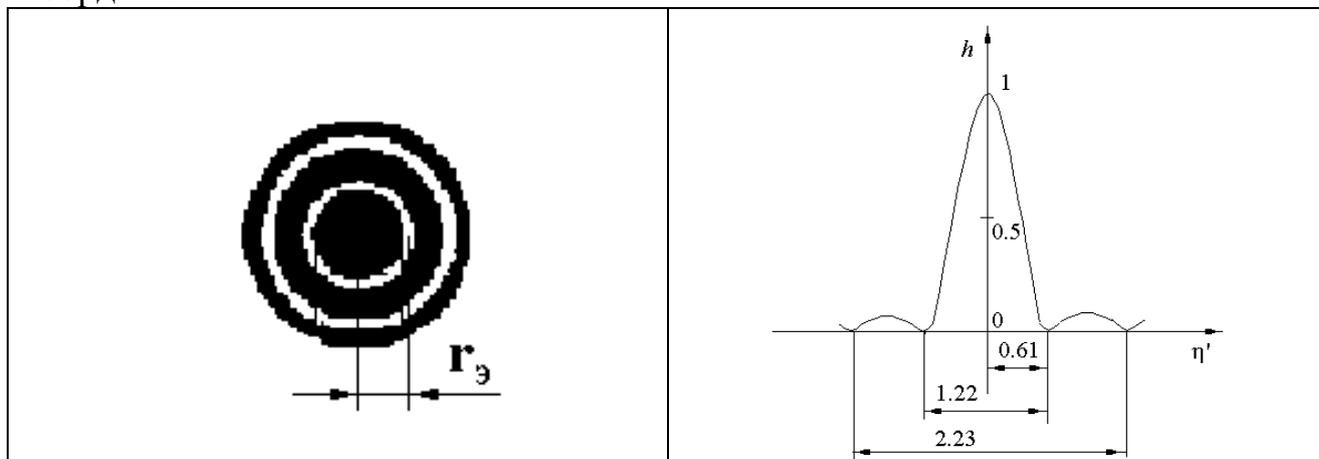


Рис. 1. Распределение интенсивности в плоскости, расположенной по нормали к оптической оси, определяется функцией рассеяния в соответствии с соотношениями для дифракции Фраунгофера

Распределение интенсивности в плоскости, расположенной по нормали к оптической оси, определяется функцией рассеяния в соответствии с соотношениями для дифракции Фраунгофера, аналогичными тем, что описывают формирование функции рассеяния точки (ФРТ) для фокусирующей оптической системы с круглым зрачком.

$$h(\eta') = [2J_1(2\pi\eta') / 2\pi\eta']^2 = \text{Bes} \sin^2[2\pi\eta'] ,$$

где $h(\eta')$ - нормированная ФРТ.

Используя выражение (2.5), можно найти радиус $r'_Э$ диска Эри. Из (2.3) находим:

$$y' = \eta' \lambda / A' ,$$

Далее по таблицам Бесселевых функции определяют значение переменной η' , соответствующее первому дифракционному минимуму (первому темному кольцу); оно составляет $\eta' = 0,61$.

Тогда, полагая $r'_Э = y'$, получим

$$r'_Э = [0,61\lambda / A'] , \text{ мм.}$$

Угловой размер радиуса Эри составляет:

$$\Psi'_Э = [1,22\lambda / n' D'] , \text{ рад,}$$

где D' - диаметр выходного зрачка.

Итак, при диаметре отверстия 2 – 8 мкм угловое распределение интенсивности по поверхности сферического дифрагированного волнового фронта (рис. 1) связано с функцией Бесселя первого рода первого порядка $J(Z)$, центральный максимум которого имеет диаметр, определяемый диаметром дифрагирующего отверстия данного интерферометра. Моделируемое угловое распределение интенсивности имеет максимум в центре при Бесселевом законе распределения.

$$D(x', y') = \left[\frac{2J(Z)}{Z} \right]^2$$

где $Z = 2\pi r' \frac{A'}{\lambda}$.

Здесь r' – расстояние от центрального максимума ,

λ - длина волны излучения в интерферометре,

A' – апертура дифрагирующего отверстия,

$$A' = D/2R_d,$$

R_d - радиус кривизны дифрагированного волнового фронта (расстояние от дифрагирующего отверстия).

Таким образом, распределение интенсивности по поверхности дифрагированного волнового фронта является неравномерным и связано с функцией Бесселя. Однако рассмотрение таблицы распределения интенсивности по дифракционному пятну [9] показывает, что уровень интенсивности на краю дифрагированного фронта составляет, например, 0,77 при $Z=1$ и 0,33 при $Z = 2$.

Так как чувствительность основных приемников изображения для интерферометра, включая глаз, фотографические, телевизионные и матричные камеры, связана с логарифмом интенсивности, то падение уровня интенсивности по полю интерферограммы от 1 до 0.33 оказывается практически неразличимым, и такое поле картины выглядит и используется как равномерное по освещенности.

ТРЕБОВАНИЯ К АНАЛИЗАТОРУ ИНТЕРФЕРОГРАММ

1. ЗАДАЧА ТРАНСФОРМАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ДВУХЛУЧЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

1.1. Анализ ФП метода интерферометрии деформаций волнового фронта показывает, что для традиционного, наиболее распространенного двухлучевого интерферометра относительная интенсивность в интерференционной картине \tilde{I} связана с искажениями волнового фронта ω (в волновой мере) периодической зависимостью (4) (рис. 5):

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi\omega$$

Распределение освещенности в интерференционной картине носит синусоидальный характер, что приводит к нерезкости интерференционных полос и, в связи с этим, снижению точности измерительных наводок на элементы такого изображения.

1.2. Предложенный метод повышения точности интерферометрии за счет снижения погрешностей расшифровки координат интерференционных полос основывается на трансформации распределения интенсивности в интерференционной картине (рис. 3). Трансформацию выполняет приемник изображения, обладающий ФП необходимого рода, обычно типа “ИМПУЛЬС” или “ГРЕБЕНКА (*comb*)” [15]. При этом каждая нерезкая интерференционная полоса преобразуется в систему тонких и четких линий (рис. 42 - 47). В результате, погрешность определения координаты интерференционной полосы в данной ее точке снижается в 10 – 40 раз.

Требуемый приемник изображения (система анализа интерферограммы) реализуется на основе фотографических, телевизионных или компьютерных устройств.

Прототипом для решения данной задачи может служить комплекс телевизионного анализатора интерферограмм (ТАИ-1), созданный на основе технического задания, разработанного на ЛОМО в соответствии с концепциями, предложенными В.К.Кирилловским и В.А.Маларевым, и реализованный под их научно-техническим руководством (рис. 44).

1.3. Интерферограммы, соответствующие сложной картине ошибок и зашумленные при контроле сложных систем, не поддающиеся автоматизированной расшифровке на известных комплексах типа Zygo, могут

быть без труда измерены и интерпретированы с помощью созданного комплекса ТАИ в интерактивном режиме и реальном времени благодаря участию оператора, вооруженного анализатором интерферограмм как инструментом выявления малых ошибок.

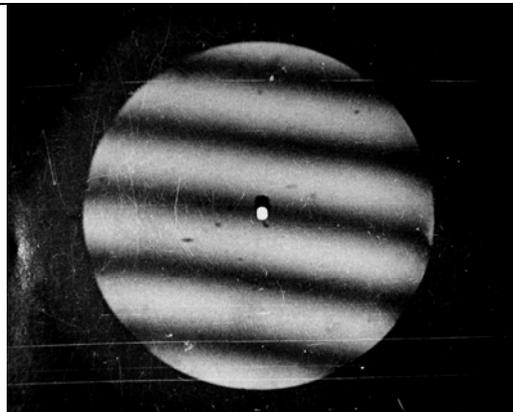


Рис. 4. Распределение освещенности в интерференционной картине носит синусоидальный характер, что приводит к нерезкости интерференционных полос



Рис. 5. Метод трансформации распределения интенсивности в интерференционной картине

Анализ погрешностей метода интерферометрии

Испытания и аттестация реализованных дифракционных интерферометров не выявили погрешностей, которые превышали бы значения $0,02 \lambda$. Практика работы дифракционных интерферометров с обработкой интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос (например, при помощи анализатора интерферограмм ТАИ-1) показала возможность обнаружения и оценки ошибок волнового фронта на уровне $0,005 \lambda$ в реальном времени в интерактивном режиме.

Сферические вогнутые поверхности могут контролироваться таким прибором с точностью лучше $0,01$ длины волны.

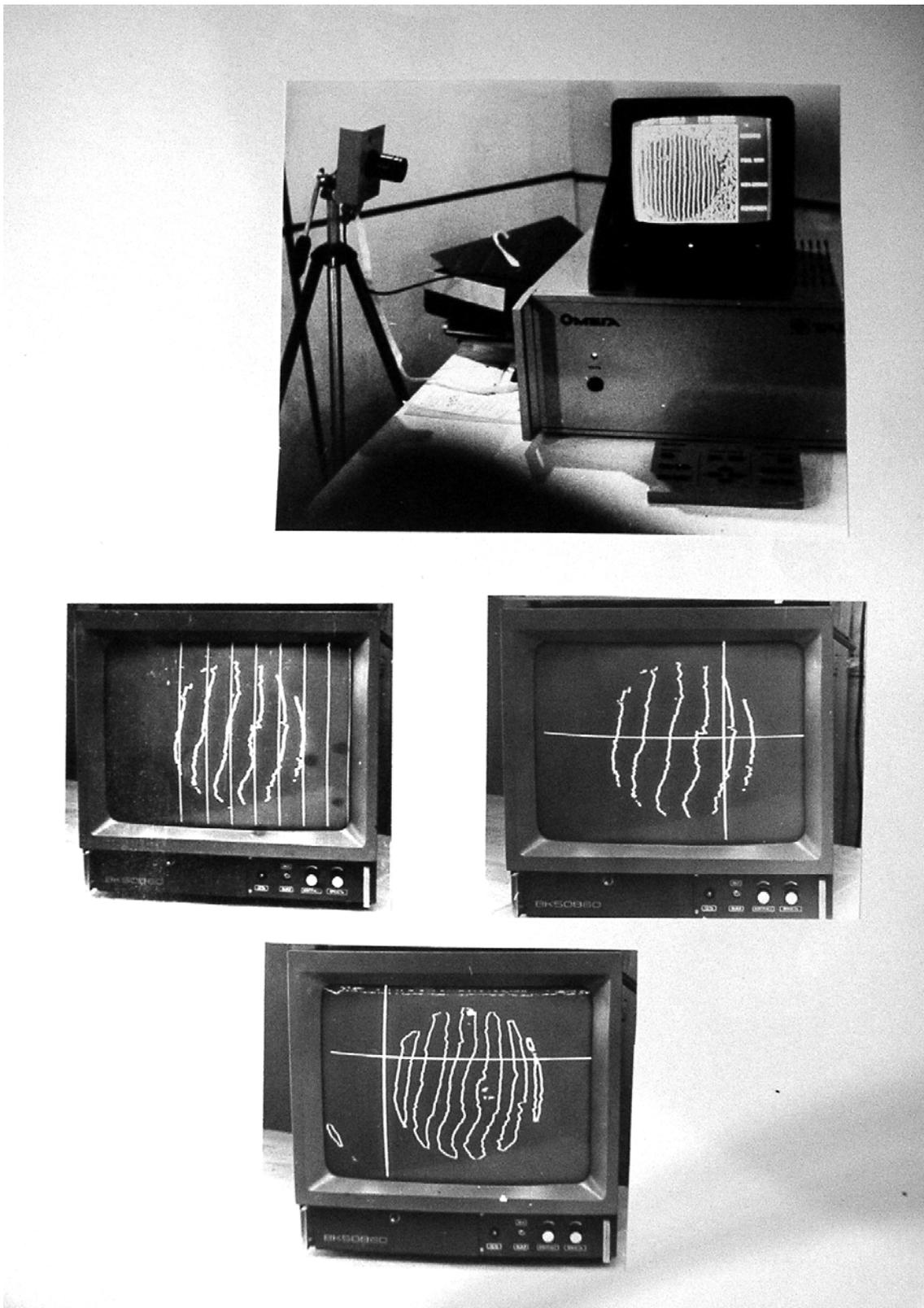


Рис. 6. Комплекс телевизионного анализатора интерферограмм (ТАИ-1)

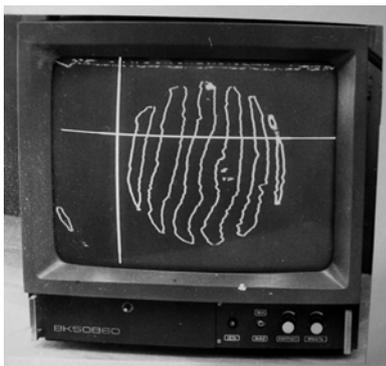


Рис. 45. Изофоты интерференционных полос

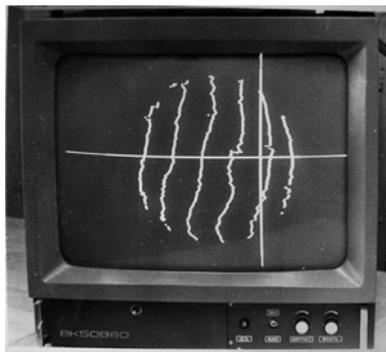


Рис. 46. Линии максимальной интенсивности интерференционных полос



Рис. 47. Наложение генерированной опорной сетки как модели идеальной интерферограммы

Для контроля асферических поверхностей предусмотрены два способа. Первый: использование анаберрационных схем контроля с применением технологических зеркал, изготовленных под данный интерферометр. Второй: применение коррекционного объектива, также изготовленного и аттестованного под данный интерферометр.

Анализ источников погрешностей метода интерферометрии на основе разработанной модели дифракционной интерферометрии показал, что погрешность измерения ошибки рефракции оптических систем и элементов методом интерферометрии определяется погрешностью измерения координаты границы элемента интерферограммы, но эта граница является нерезкой. Следовательно, для увеличения точности метода интерферометрии, необходимо увеличение градиента пограничной зоны границы интерференционного изображения в зрачке исследуемой оптической системы.

Распределение интенсивности интерферограммы формируется в два этапа:

I этап - формирование оптического изображения интерферограммы в зоне выходного зрачка исследуемой оптической системы.

II этап - формирование интерференционного изображения на чувствительной площадке приемника изображения.

Функция распределения интенсивности в этом изображении формируется как *свертка* ряда функций

Из литературы и практики хорошо известен недостаток метода интерферометрии, состоящий в существенной нерезкости края интерференционной полосы которое можно описать функцией $I_{ИНТ}$. Для анализа причин и разработки путей устранения этого недостатка традиционных методик, мы рассматриваем здесь источники указанной нерезкости.

С учетом влияния $I_{ФРТ}$ и Π - функции рассеяния точки приемником

изображения, структура края полосы интерференционного изображения, сформированного на поверхности чувствительной площадки приемника, описывается операцией свертки:

$$I_{\Sigma 1} = I_{\text{ИНТ}} \otimes I_{\text{ФРТ II}}$$

Далее, с учетом влияния функции рассеяния точки для оптической системы $I_{\text{ФРТ(I)}}$, которая определяется, главным образом, аберрациями и дифракцией на зрачке, можем записать:

$$I_{\Sigma 2} = I_{\Sigma 1} \otimes I_{\text{ФРТ(I)}}.$$

Рассмотрение источников погрешностей метода показало, что одной из основных является погрешность считывания координат элементов картины. Причиной неопределенности в процессе совмещения измерительной марки с заданным элементом теневой картины является нерезкость элементов интерферограммы.

Показано, что среднеквадратическая погрешность σ_n наведения измерительной марки на край не вполне резкого элемента изображения зависит от величины максимального пограничного градиента g_{max} в этом изображении и связана с ней практически обратно пропорциональной зависимостью.

Предлагается, наряду с рассмотренными способами повышения резкости интерферограммы, также способ повышения резкости, основанный на трансформации структуры изображения (рис. 29). Метод основан на дискретизации пограничной зоны интерференционной полосы что, в результате, дает эффект выделения контура изображения как его изофоты. Выделение изофоты изображения достигается путем использования приемника изображения, имеющего световую характеристику импульсной формы.

Пограничная зона интерферограммы при трансформации изображения, характеризуемого применением импульсной функции преобразования, сама приобретает импульсный характер распределения интенсивности; происходит оконтуривание края тени с выделением изофоты. При этом резко возрастают пограничные градиенты в полученном изображении.

В процессе такой трансформации изображения выделение изофоты осуществляется программно в ходе цифровой (компьютерной) обработки массива данных, описывающих теневую картину. При макетировании и отладке метода использован образец PDI – интерферометра, оснащенный электронным анализатором интерферограммы ТАИ, а также компьютер с программным пакетом Adobe Photoshop, в котором присутствует опция выделения контура обрабатываемого изображения.

Немногочисленные местные мелкоструктурные искажения контурной пограничной линии связаны с местными дефектами полученного оптического изображения и остаточными шумами системы отображения и обработки изображения. Исследованиями и практикой проведения измерений здесь выявлено, что такие местные искажения не сказываются на точности и достоверности измерений.

Экспериментальная отладка и испытания метода показали, что проводимая изофотометрия интерференционной картины позволяет дополнительно повысить точность считывания координаты края интерферограммы в 8-12 раз.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Компьютерные методы

Примером высококачественного программного обеспечения для обработки интерферограмм служит Пакет исследовательских программ **MathOPTIX Zebra**, предназначенный для обработки и анализа данных интерферометрических измерений. Программное обеспечение разработано в Санкт-Петербургском Государственном университете информационных технологий, механики и оптики на Кафедре прикладной и компьютерной оптики творческим коллективом **MathOPTIX Group**. Пакет содержит ряд специализированных программ, позволяющих осуществлять автоматизированный ввод интерферограммы в компьютер, выполнять ее автоматизированную расшифровку и всестороннюю обработку и интерпретацию данных, включая определение характера и величины аберраций, а также вычисление характеристик качества изображения.

Программа **Zebra Master** предназначена для регистрации, обработки и анализа интерференционных картин с целью получения информации о деформации исследуемых волновых фронтов.

Программа позволяет конвертировать интерференционные картины из наиболее распространенных графических форматов файлов (BMP, TIFF, GIF и JPEG), что дает возможность использовать эту программу и без непосредственного подключения компьютера к интерферометру.

Практика показала возможность и удобство применения цифровой фотокамеры для регистрации интерферограмм и последующего накопления их на компьютерных носителях информации с тем, чтобы далее, после отбора необходимых изображений ввести их в программу **Zebra Master**, выполнить цикл обработки и получить требуемые результаты. Такая технология особенно продуктивна, если иметь в виду действие вибраций, приводящих к постоянному и нерегулярному перемещению системы интерференционных полос. в этих условиях принятый в производственной практике способ регистрации состоит

в получении серии кадров интерферограммы в заданных условиях с последующим отбором наиболее удачных изображений.

Zebra Master автоматизирует все этапы обработки интерферограмм, делая этот процесс удобным, быстрым и точным.

Основные возможности программы

Регистрация интерферограммы с использованием любого устройства ввода изображений, поддерживающего интерфейс TWAIN (такие , как видекамера, цифровая фотокамера или сканер).

Конвертирование интерференционных картин из наиболее распространенных графических форматов файлов (BMP, TIFF, GIF и JPEG).

Сохранение интерферограммы, а также результатов их обработки, в файл с дополнительными параметрами в формате IGM.

Выполнение предварительной обработки интерферограмм с целью улучшения их качества (учет неравномерности освещенности интерферограммы, устранение шумов).

Выбор из серии зарегистрированных интерферограмм лучшей по контрасту.

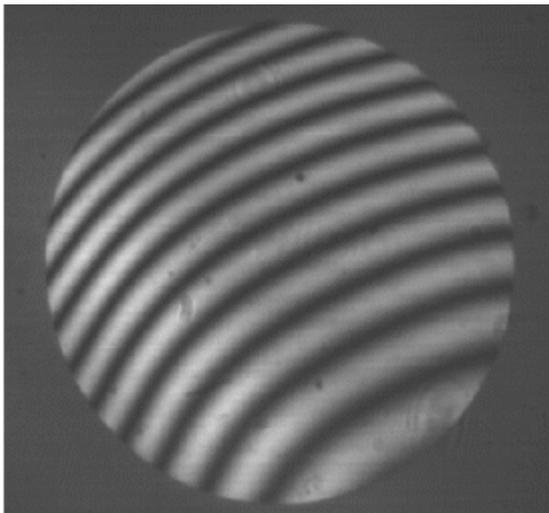
Выполнение автоматизированной обработки интерферограмм (определение преимущественного направления полос, контура интерферограммы, координат максимумов интерференционных полос).

Определение параметров математической модели измеряемой функции волнового фронта и ее числовых характеристик (коэффициенты разложения по полиномам Цернике, размах деформации и среднеквадратическое значение, размах и направление составляющей комы, направление астигматической составляющей и т.п.).

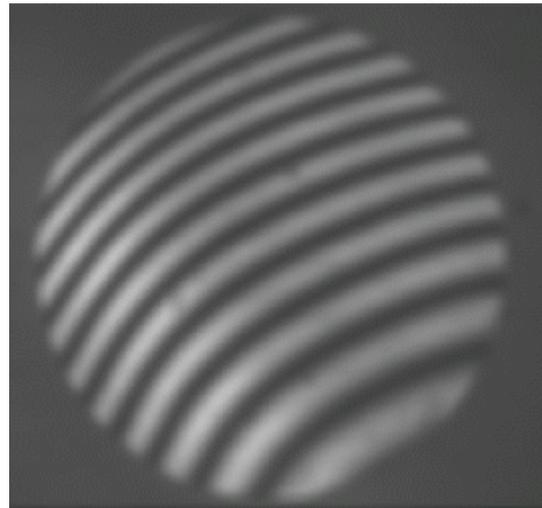
Основные правила работы с программой

1) Интерферограмма может быть открыта из файла в графических форматах BMP, TIFF, GIF и JPEG или из файла в формате (IGM. - это стандартный формат программы **Zebra Master**, который можно использовать в случае необходимости повторной обработки ранее зарегистрированных, обработанных и сохраненных на диске интерферограмм.).

2) Фильтрация интерференционной картины - является первым этапом обработки интерференционной картины



До фильтрации



После фильтрации

Рис. 42. Фильтрация шумов интерферограммы в программе ZEBRA.

Фильтрация интерферограммы приводит к устранению шумов, что способствует более стабильной работе алгоритмов расшифровки.

3) Вторым этапом обработки интерференционной картины является определение контура интерферограммы.

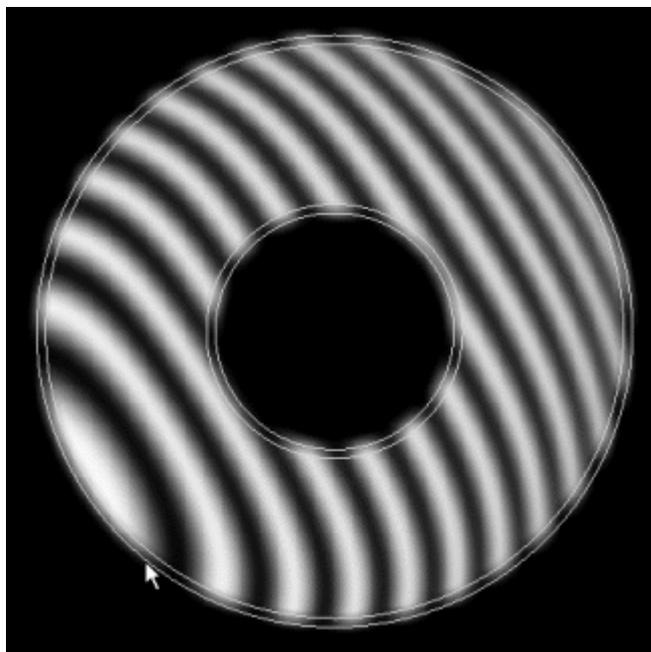


Рис.43..Автоматическое определение контура интерферограммы программой Zebra Master.

При обработке интерферограмм полученных при контроле деталей с отверстием в поле "Экранирование" необходимо указать относительный

коэффициент экранирования. Размеры и положение контура можно изменять с использованием мыши.

4) Третьим этапом обработки интерференционной картины является определение линии первоначального сканирования. При переходе к этому этапу программа определяет линию сканирования автоматически

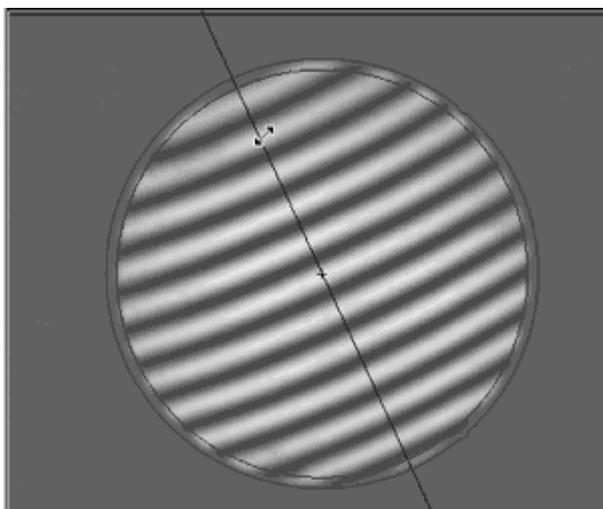


Рис. 44. Автоматическое определение линии первоначального сканирования

5) Основной этап обработки - расстановка точек на интерференционных полосах.

Расстановка точек на минимумах полос является более стабильной и менее зависимой от уровня шумов и яркости интерференционных полос.

Возможна также расстановка точек на максимумах интерференционных полос, которую предпочтительно использовать при обработке качественных (не зашумленных, с равномерной освещенностью) интерференционных картин.

Каждая интерференционная полоса соответствует определенному значению деформации волнового фронта, причем значение деформации волнового фронта от полосы к полосе изменяется на одну длину волны. При нумерации полос не существенно, с какой стороны начинается нумерация полос, но обязательным условием восстановления функции деформации волнового фронта является точное соблюдение относительного изменения величины деформации волнового фронта. Для выполнения этого условия требуется, чтобы полосы имели сквозную нумерацию.

Если алгоритм при автоматической расстановке точек пропускает полосу, то есть между полосой, предшествующей пропущенной, и полосой, следующей за пропущенной, автоматически принимается разность функции деформации волнового фронта равная одной длине волны, следует увеличить номер полосы, на единицу. Для этого нужно нажать кнопку **"Увеличить номер полосы"**, когда в списке полос выбрана полоса, следующая за пропущенной. Если пропущено больше одной полосы, то номер полосы, следующей за последней пропущенной, следует увеличить на количество пропущенных полос.

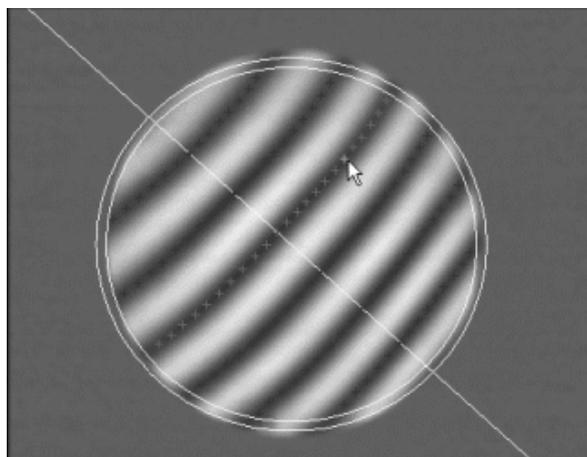


Рис.45. Основной этап обработки - расстановка точек на интерференционных полосах.

б) Последний этап обработки интерференционной картины - аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике.

С использованием данного диалогового окна можно выполнить рабочий анализ результатов полученных после аппроксимации.

В списке "**Коэффициенты**" отображаются все коэффициенты полиномов Цернике. В зависимости от выбранного набора коэффициентов определяются характеристики функции деформации волнового фронта: размах, максимальное и минимальное значения волнового фронта, среднеквадратическое отклонение деформации, величина сферичности и нерегулярности.

В группе "**Параметры деформации**" отображаются основные параметры деформации волнового фронта. Размах, максимум, минимум и СКВО вычисляются согласно выбранным коэффициентам деформации и выборки восстановленного волнового фронта. Сферичность и неравномерность вычисляются независимо от выбранных коэффициентов.

Элементы управления из группы "**Параметры диаграммы**" позволяют изменить внешний вид диаграммы волнового фронта: включить и отключить отображение сетки, линейки, сечений и легенды. С помощью мыши в области просмотра можно установить линии анализируемых сечений: горизонтального и вертикального.

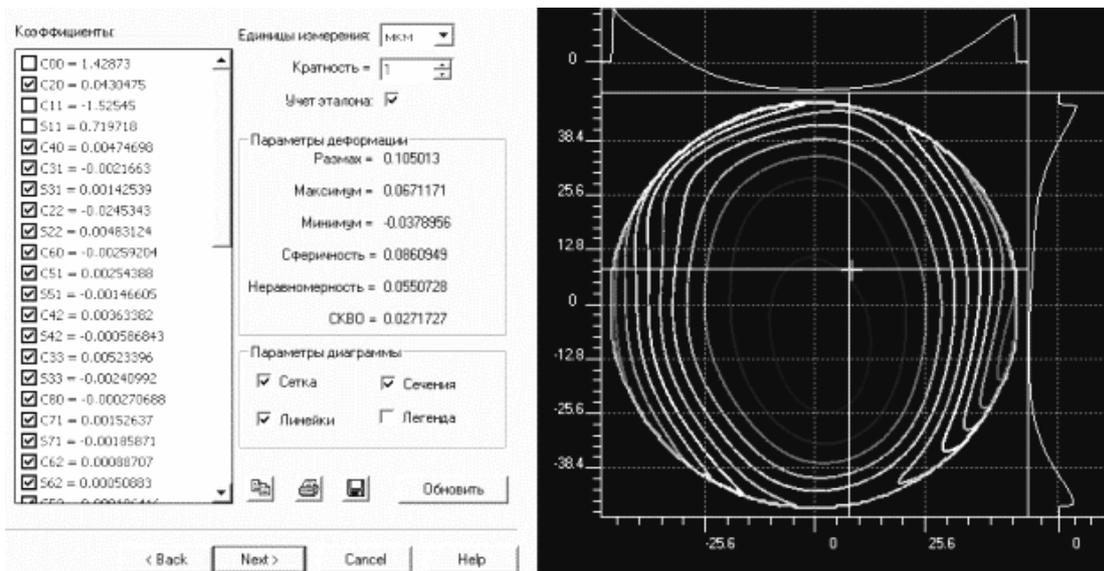


Рис.46. Аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике

Программа Zebra Imager

Программа Zebra Imager предназначена для анализа характеристик качества оптического изображения.

Возможности программы Zebra Imager :

Анализ характеристик качества оптического изображения:

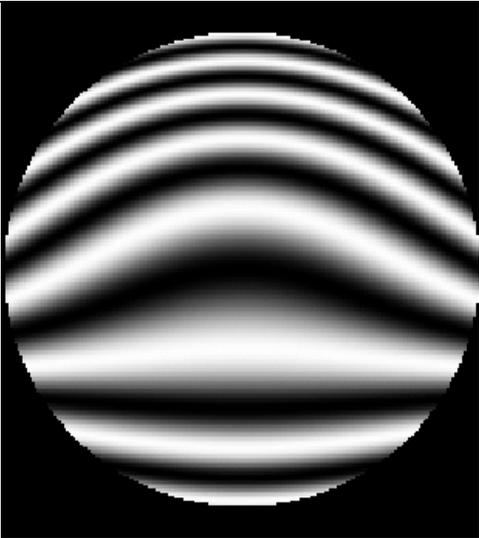
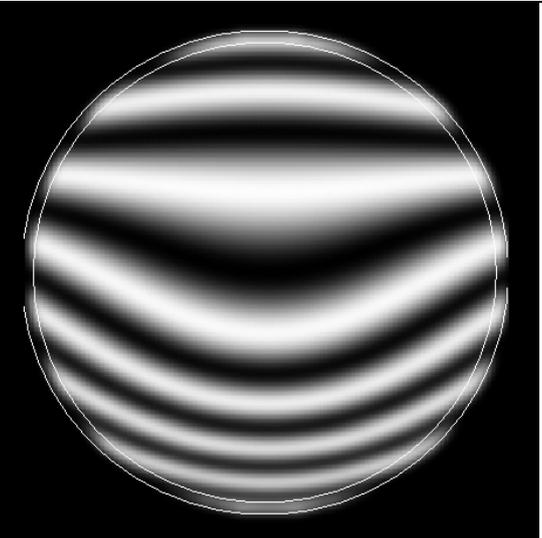
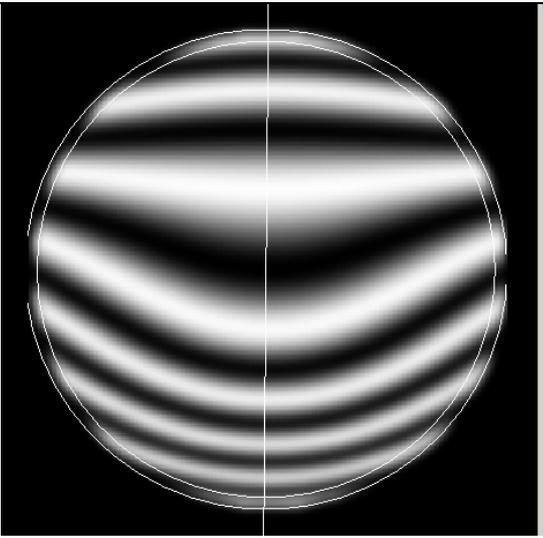
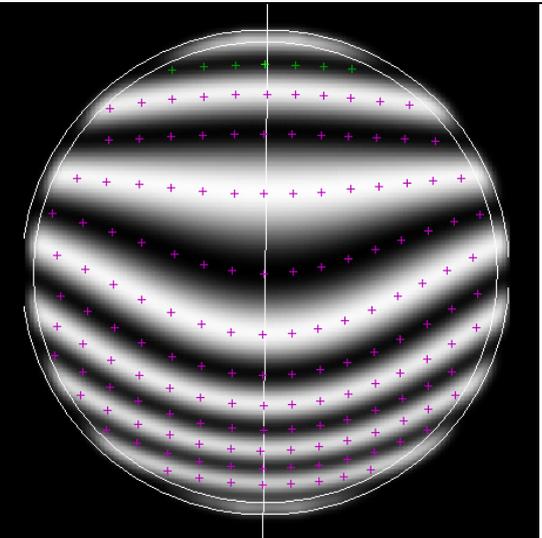
- функции рассеяния точки;
- функции рассеяния линии;
- функции концентрации энергии;
- пограничной кривой;
- модуляционной передаточной функции;
- фазовой передаточной функции.

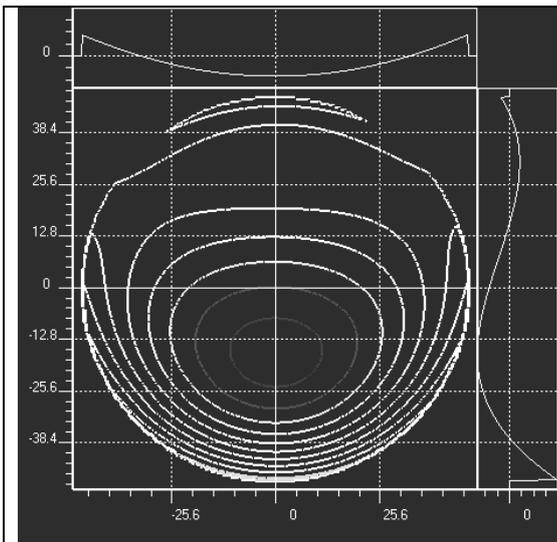
Моделирование формирования изображения стандартных тест-объектов (вертикальная или горизонтальная решетка, радиальная мира). Анализ интерферограммы и волнового фронта.

Работа с **Панелью анализа** строится также на использовании закладок, переключая которые можно анализировать волновой фронт, интерферограмму и различные характеристики качества (ФРТ, ФКЭ, ФРЛ, Пограничная кривая, МПФ и ФПФ), осуществлять моделирование изображения.

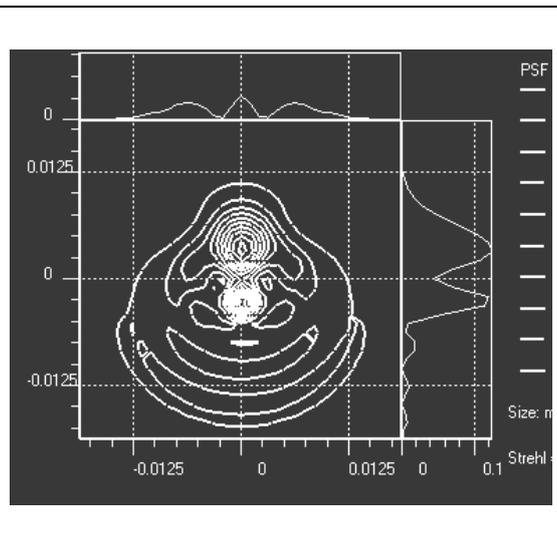
Проследим цикл обработки типичной интерферограммы в пакете ZEBRA (Табл.4).

Таблица 4

	
<p>Исходная интерферограмма</p>	<p>Определение контура картины</p>
	
<p>Определение линии сканирования</p>	<p>Расстановка точек на экстремумах полос</p>



Карта функции деформаций волнового фронта



Карта функции рассеяния точки для исследуемой системы

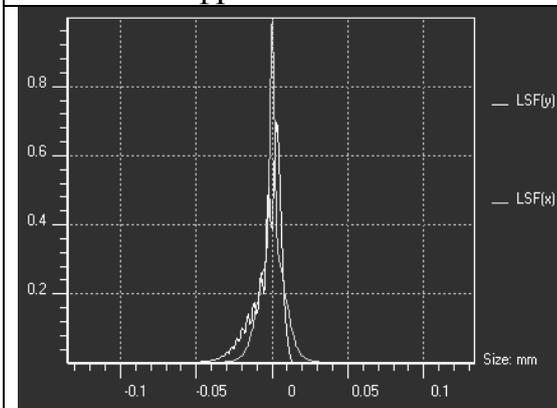


График функции рассеяния линии для исследуемой системы

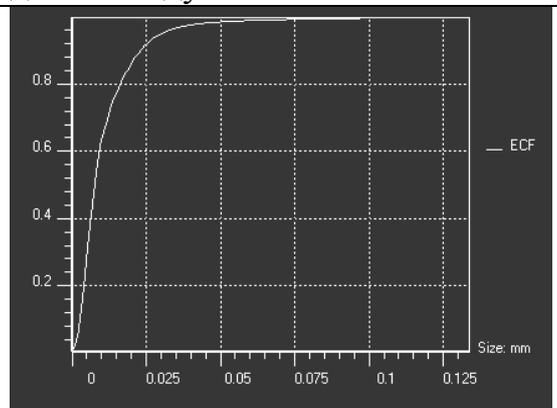
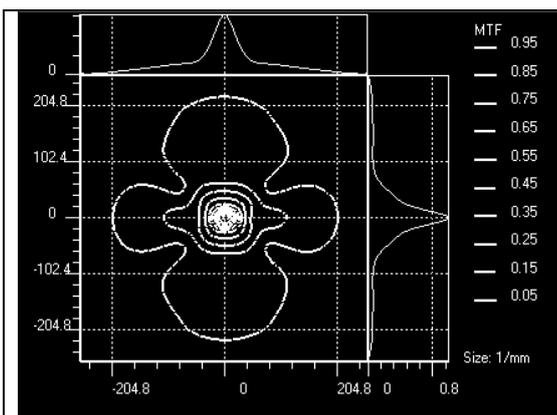
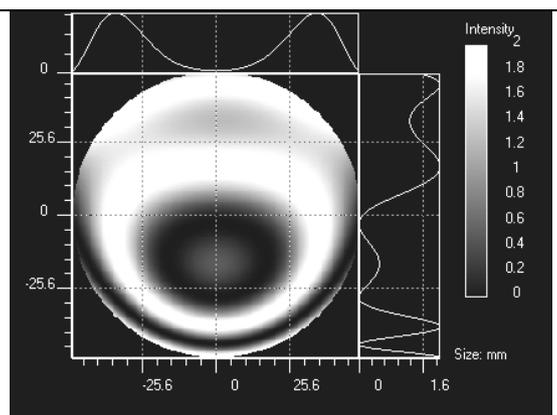


График функции концентрации энергии для исследуемой системы



Карта и графики функции передачи модуляции



Моделирование интерферограммы Ньютона (вид под пробное стекло)

РАЗРАБОТКА КОММЕРЧЕСКОГО ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА PD(POINT-DIFFRACTION)-ИНТЕРФЕРОМЕТРА (С ДИФРАКЦИЕЙ НА ТОЧКЕ) ДЛЯ САМОЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Значение проблемы

Расширение возможностей оптических измерений и исследования создает условия для развития и изготовления оптических устройств новых классов точности, требуемой современной наукой и практикой. Такие системы: космические телескопы, современные исследовательские микроскопы, оптические системы для микроэлектроники, особенно для UV (ультрафиолетовое излучение) и EUV (дальний ультрафиолет) литографии, системы для лазерных технологий, и т.д. Проектирование и устойчивое изготовление этих систем во всем мире сталкивается с неизбежно возрастающими проблемами точной техники испытания, которая во-первых зависит от качества интерферометрических образцовых поверхностей (“эталоны”). Традиционный эталон – это оптическая поверхность, принадлежащая к испытательной пластине. Эта поверхность не может служить как абсолютный эталон, потому что требуется ее аттестация с точностями, превышающими возможности традиционной измерительной техники. Таким образом, неизбежные погрешности изготовления “эталоны” для интерферометра известны лишь на уровне свыше величины $1/20$ длины световой волны, что намного выше требуемого уровня $1/1000$ длины световой волны. Кроме того, аттестация интерферометра выполняется лишь однажды, в процессе его изготовления, и нет гарантии от искажения формы эталона в процессе эксплуатации под влиянием термических, динамических и гравитационных воздействий.

Главное направление дальнейшего развития современных интерферометров - создание устройств, в котором не требуется применение эталона (т.е. образцовой оптической детали).

В этих интерферометрах опорный волновой фронт сформирован дифракцией лазерного луча маленькой апертурой с диаметром, соизмеримым с длиной волны.

Первая схема интерферометра по данному принципу известна как интерферометр Линника. Сегодня интерферометры такого типа называют интерферометрами с дифракцией на точке (PDI).

Проблема промышленного выполнения таких инструментов требует разработки конструкции, обеспечивающей простоту и надежность настройки прибора для реализации ясной устойчивой картины интерференции, подходящей для дальнейшей количественной обработки.

Традиционные интерферометры (например, Физо) дают такую картину достаточно просто, и поэтому они находятся на рынке сегодня.

Существующее предложение основано на лабораторном опыте ИТМО при создании лазерного интерферометра с опорным волновым фронтом, синтезированным путем дифракции на точечном отверстии – интерферометра, обеспечивающего готовую к обработке картину интерференции.

ТЕНДЕНЦИИ ТЕХНОЛОГИИ И РЫНКА - СРАВНЕНИЕ РОССИИ И ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

На мировом рынке в настоящее время доступны традиционные интерферометры. Главный недостаток традиционных интерферометров - потребность применения для их конструкции образцовой оптической детали для формирования опорного волнового фронта. Такие оптические элементы неизбежно имеют остаточные ошибки производства (минимум - относительно длин $1/20$ волны). Следовательно, интерферометр, в котором такая поверхность сравнения используется, может использоваться для оценки ошибок оптических элементов и систем на уровне относительно длин волны $1/4$. Помимо проблем высокой точности эталона имеется проблема стабильности формы образцовой оптической поверхности, которая изменяется при действии температуры, гравитационных и динамических факторов. Погрешности могут быть незначительными и составлять делать приблизительно 0.01 длины волны. Однако для самых высоких уровней точности контролируемых изделий такие ошибки недопустимы. Важная проблема, что величина остаточной погрешности эталона фактически, является неизвестной, и достоверная аттестация интерферометра, сделанного изготовителем, действительно проблематична. Кроме того, образцовая оптическая деталь очень дорога в производстве.

Самая большая популярность для технологического и испытание качества поверхностей сравнения, оптических систем и деталей принадлежит автоматизированным интерферометрическим комплексам типа Zygo, Moller-Wedel и их аналогам. Преимущество этих устройств - оптический уровень точности измерений (достаточный для проверки продукции среднего класса точности порядка $1/20$ длины волны), достаточная универсальность, обработки данных на компьютере и наглядное представление результатов.

Однако комплекс Zygo и его аналоги имеют ряд фундаментальных недостатков, которые не упомянуты в рекламных материалах. Это обстоятельство может дезориентировать покупателя измерительного оборудования, планирующего изготовление оптических систем лучшего класса. Такая дезориентация создает для поставщика точной оптики чрезвычайно серьезные и дорогие проблемы. Авторитет громкого имени поставщика измеряющего оборудования приводит к инцидентам, когда широко рекламируемое оборудование неправильно применяется к целям, для которых оно в основном не предназначено. Такая

ошибка способна причинить фатальные просчеты в существенных и уникальных проектах.

Согласно рекламным данным, эти остаточные ошибки производства делают $1/10 - 1/30$ длина волны и, следовательно, такие устройства подходят для правильного определения только довольно больших остаточных ошибок проверенного изделия, на уровне $1 - 1/3$ длины волны. Поэтому изделия с такими ошибками в современных условиях могут относиться только к среднему, но не к самому высокому классу точности. Оптические системы лучшей используемой точности, например, в космических телескопах, микроскопах исследования и системах для микроэлектроники, не могут иметь остаточные ошибки, превышающие $1/30 - 1/40$ длины волны. Поэтому ошибка измеряющего оборудования для создания таких оптических систем не должна быть больше, чем $1/300 -$ длины $1/400$ волны.

Дополнительные встроенные системы для расшифровки интерферограмм (такие как V-100 с Intomatic-P компании Moller-Wedel или устройства расшифровки, поставляемые с интерферометром ZYGO) позволяют, по заявлениям продавцов, повышать точность до $1/80 - 1/1000$ долей длины волны. Однако это утверждение основано на недоразумении. Это означает только точность измерения отклонений от формы образцовой поверхности, погрешности которой на данном уровне точности неизвестны.

Однако потребитель не будет удовлетворен этим обстоятельством. Он нуждается в изделии, ошибки которого не превышают $1/30 - 1/40$ длины волны и, в наиболее сложных случаях, еще менее - до $1/1000$ длины волны.

Гарантировать достижение этого условия рассматриваемый интерферометр не способен. Кроме того, стоимость комплекса типа Zygo, составляет 500,000 - 800,000 USD.

В настоящее время в России никакое интерферометрическое оборудование не изготавливается индустриально. Производство русского аналога Zygo - интерферометрического комплекса IKD-110 (разработанного LOMO Ltd. в Санкт-Петербурге) теперь остановлено.

Качество технологии

Технологические ресурсы отечественной промышленности, в частности АО "ФОКУС", применяются сегодня в создании нового поколения интерферометрических устройств, основанных на дифракции света на точке при формировании опорного волнового фронта. Предлагается брать как основное устройство "IN-SPECTRO" в лабораторной версии, разработанные профессором В.К.Кирилловским. Построенный на новой системе интерферометрических принципов, прибор "IN_FOCUS" дает полную и точную информацию относительно минимальных ошибок изделия. Это впервые дает изготовителю возможность видеть и надежно оценивать минимальные ошибки созданного оптического изделия на уровне $1/100\lambda$ при амплитудной расшифровке и $1/1000$ длины волны при фазовой [7] расшифровке

интерферограммы. Дополнительная возможность интерферометра состоит в том, чтобы устранять ошибки в ходе технологических операций при непрерывном наблюдении процесса их устранения.

“IN_FOCUS ” имеет, при этом, все возможности аналогов типа Zygo.

Среди этих возможностей:

- Достаточная универсальность: контроль выпуклых, плоских и вогнутых оптических поверхностей, линз и объективов
- Впервые интерферометр позволяет контролировать деформации поверхности оптического контакта при соединении деталей методом оптического контакта.
- Обработка данных на компьютере.
- Наглядное представление результатов.

Кроме того, благодаря применению новых принципов, развитых в течение 15-летних исследований, “IN_FOCUS ” впервые создает набор уникальных дополнительных возможностей:

- Точность измерения абсолютных значений ошибок и аберраций:

- 1) В воздухе - это - лучше $1/100$ длины волны,
- 2) В вакууме - это лучше чем $1/300$ длины волны.

Имеются условия для дальнейшего увеличения точности в 3 -5 раз.

Новый принцип впервые позволяет создавать идеально сферический опорный фронт волны путем дифракции.

Дадим сравнительный анализ характеристик предлагаемого интерферометра “IN_FOCUS ” и иностранного аналога – интерферометра ZYGO.

“IN_FOCUS ”

1. Для испытания вогнутых поверхностей образцовая поверхность не требуется.

Для испытания выпуклых и плоских поверхностей образцовая поверхность сделана под интерферометр “IN_FOCUS ” при нулевой погрешности эталона с необходимой точностью; таким образом, интерферометр обеспечивает непрерывную само-проверку образцовой поверхности в ходе процесса измерения.

2. Полная точность измерения длин волны $1/600$

3. Воспроизводимость результатов длин волны $1/1200$

4. Предусмотрена прямая оценка качества изображения исследуемой оптической системы.

5. Устранение ошибок, вызванных вибрациями установки и объекта.

6. Исследование хроматизма также возможно.

7. Модульная гибкая структура комплекса обеспечивает создание различных схемных решений для реализации различных требуемых методов контроля.

8. Сравнение с характеристиками исследованной оптической системы (опытного образца) непрерывно в режиме реального времени

ZYGO

1. Отклонение от образцовой поверхности в течение производства - $1/10 - 1/30$ длины волны.
2. Надежность оценки ошибки не подтверждена.
3. Полная точность измерения - длина волны $1/14$.
4. Воспроизводимость результатов - $1/100$ длины волны.
5. Оценка качества изображения косвенная, без учета влияния дифракции.
6. Устранение ошибок, вызванных колебаниями, проблематично.
7. Измерение хроматических аберраций затруднено.

Специальное примечание

Предложенный тип интерферометра может показывать большое преимущество для стадии изменения характера поверхности. В то время как традиционные интерферометры (Fizeau, Twyman) требуют, чтобы перемена детали сопровождалась заменой образцовой поверхности (эта деталь могла иметь значительные измерения), в интерферометре "IN_FOCUS", необходимым поворачивать или переместить(изменить) очень маленькое зеркало с поверхностью невысокого качества.

Низкая надежность результирующей точности не может быть улучшена. Источники ошибок образцовой поверхности в интерферометре имеют различные виды и включают влияния, не поддающиеся контролю:

- Температурные градиенты;
- Гравитационные (например, неполная разгрузка образцового зеркала ;
- Динамические (например, при напряжениях в установочном приспособлении для образцовой детали).
- Вибрации , и т.д.

Так как не имеется никакого непрерывного контроля относительно реального состояния образцовой поверхности, то измерения, которые выполнены таким устройством, остаются не вполне надежными.

Итак, применение традиционных интерферометров может быть рекомендовано как средство контроля оптических систем и элементов только средней точности, но не самой высокой. Область их применения - испытание среднего класса оптических систем, в которых ошибки предполагаются на уровне $0,25 - 1,5$ длины волны.

ИНТЕРФЕРОМЕТР С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ ПЛАСТИНКОЙ

Распространение лазеров привело к расширению использования интерференционного метода на ЛОМО и других оптико-механических предприятиях для контроля оптических деталей и систем. Обычно применяемый для контроля качества оптических поверхностей крупногабаритных деталей неравноплечий интерферометр позволяет контролировать вогнутые зеркала с радиусом кривизны до 50 м, но обладает рядом существенных недостатков:

1. к качеству оптических деталей интерферометра предъявляются весьма высокие требования, прежде всего к светоделительному кубу и к эталонному зеркалу, точность которого определяет точность измерения;
2. требуется высококогерентный источник света;
3. контроль деталей и систем с апертурами выше 0,3 невозможен;
4. схема весьма чувствительна к вибрациям.

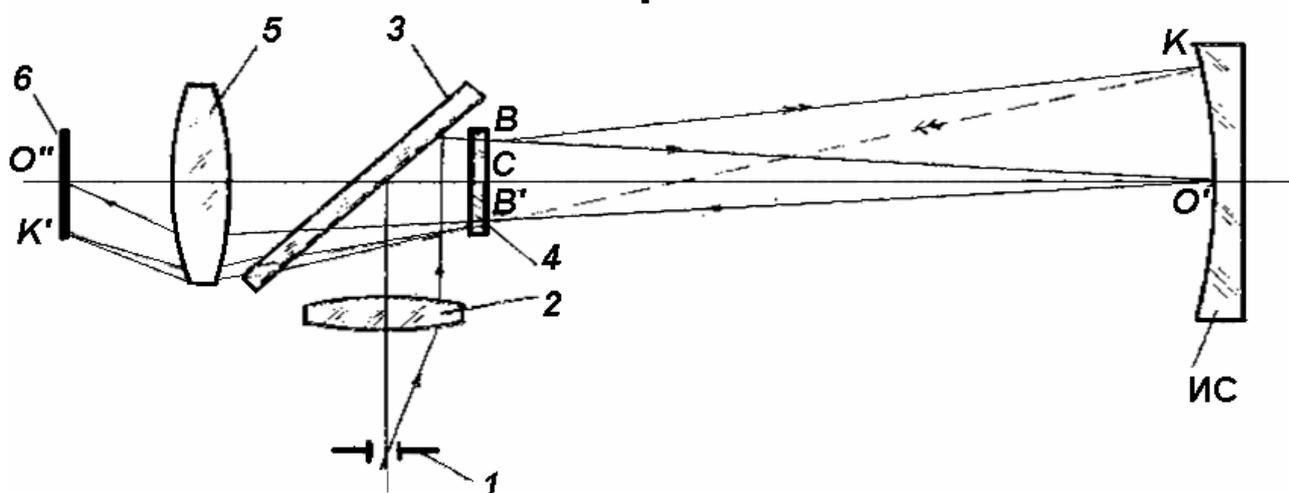


Рис. 47. Интерферометр с рассеивающей пластинкой

Развитие голографической техники позволяет создавать интерферометры, свободные от указанных недостатков. Одним из таких приборов является интерферометр с рассеивающей пластинкой (рис. 6). Свет от точечного источника 1 фокусируется объективом 2 на поверхность исследуемого зеркала, предварительно пройдя через светоделительное зеркало 3 и рассеивающую пластинку 4, которая представляет собой специфический голографический

рассеиватель, обладающий круговой симметрией структуры. Техника изготовления такого рассеивателя несложна и рассмотрена в литературе [10]. Принцип работы прибора следующий. Пусть в точку К пришел один из лучей, рассеянных пластинкой. Отраженные в точках О' и К лучи приходят в точку В' на рассеивателе, симметричную точке В первичного рассеивания. Здесь происходит вторичное рассеивание, причем рассеянная составляющая луча из точки О' накладывается на нерассеянную составляющую луча из точки К'. Лучи интерферируют между собой. Интерференционная картина, изображаемая объективом 5 в плоскости приемника 6, отражает отклонения формы исследуемой поверхности от сферы. Свет, не претерпевший рассеяния после двух прохождений через пластинку, фокусируется в виде яркой точки О'' в центре интерференционной картины, что является недостатком этой схемы, так как блик создает ненужную засветку и мешает наблюдению и регистрации интерференционной картины. Интерферометр позволяет вести контроль при апертурах до 0,45; чувствительность схемы к вибрациям мала благодаря совмещению рабочего и эталонного пучка; конструкция интерферометра не требует использования точных эталонных поверхностей.

Основной частью интерферометров с рассеивающей пластинкой является голографический рассеиватель — стеклянная пластина с высокочастотной структурой на одной из поверхностей. К этой структуре предъявляются жесткие требования в отношении центральной симметрии:

$$\tau(x, y) = \tau(-x, -y).$$

Требуемую структуру получают с помощью голографической техники. Материалом служат голографические фотопластинки. Требования к разрешению определяют, исходя из апертуры контролируемой поверхности:

$$\sin \varphi = \lambda l$$

где l — разрешение фотопластинки, φ — апертурный угол, λ - длина волны.

Для контроля типичного крупногабаритного астрономического зеркала требуются пластинки с разрешением выше 1000 мм^{-1} .

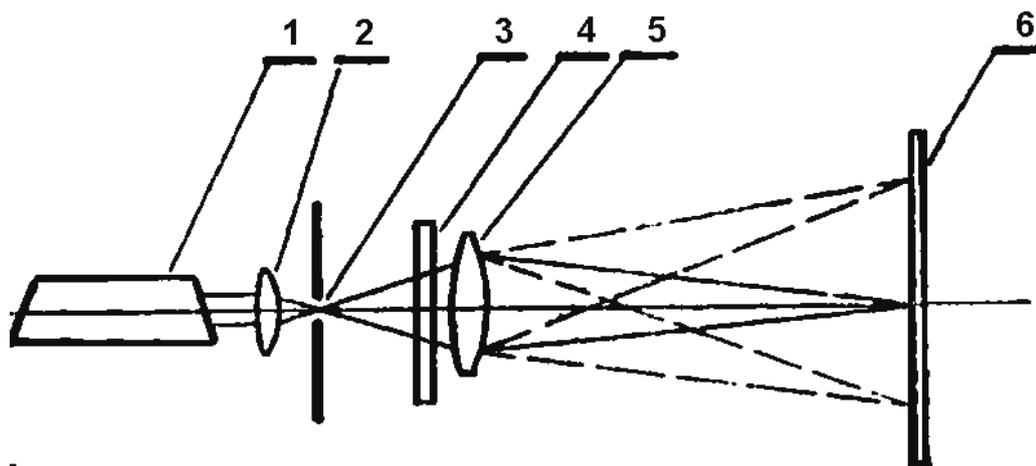


Рис. 48. Установка для изготовления голографической рассеивающей пластинки

Методика изготовления рассеивателя состоит в двукратном экспонировании пластины в плоскости сложного интерференционного изображения, возникающего при прохождении расширенного лазерного пучка через матовое стекло. Схема установки¹, собранной в ЛОМО для изготовления рассеивающих пластин, приведена на рис. 2. Луч газового лазера 7, расширенный объективом 2, в виде расходящегося пучка направляется в зрачок объектива 5 через диафрагму 3 и матовое стекло 4. Объектив сфокусирован в плоскость фотослоя голографической фотопластинки 6.

Пластинка экспонируется в исходном положении требуемое время, затем экспозиция прерывается и пластинка должна быть повернута вокруг оптической оси установки на 180° . Точность поворота обуславливает симметрию структуры голографического рассеивателя. В процессе экспонирования требуется исключить влияние вибраций на элементы схемы. В противном случае при перемещении элементов интерференционной картины по поверхности фотослоя в процессе экспонирования происходит полная либо частичная потеря структурных элементов. Это ведет к тому, что-либо интерференция с полученным рассеивателем не может быть получена вообще, либо снижается апертура, в пределах которой наблюдается интерференция от контролируемой поверхности.

Ошибка поворота пластинки при экспонировании примерно в $40''$ приводит к искривлению полос по краям наблюдаемой интерференционной картины в виде знака интеграла.

После фотографической обработки на пластинке получается голографическая рассеивающая структура в виде совокупности элементов почернения размерами $1 \div 10$ мкм. Для повышения светопропускания и уменьшения отражения света от поля рассеивателя в направлении приемника изображения выполняется отбеливание голограммы в растворе железосинеродистого калия. Таким образом, рассеиватель из поглощающего (амплитудного) превращается в фазовый, так как поглощающие элементы,

состоявшие вначале из дисперсного металлического серебра, переводятся в частицы прозрачной соли, имеющей показатель преломления, отличный от показателя преломления желатинового носителя. Оптическая плотность поля рассеивателя, дающего после отбеливания структуру с оптимальными свойствами, составляет $0,2 \div 0,3$. Максимальная апертура контролируемой поверхности, достигнутая с применением полученных описанным способом рассеивателей, составила $0,15$.

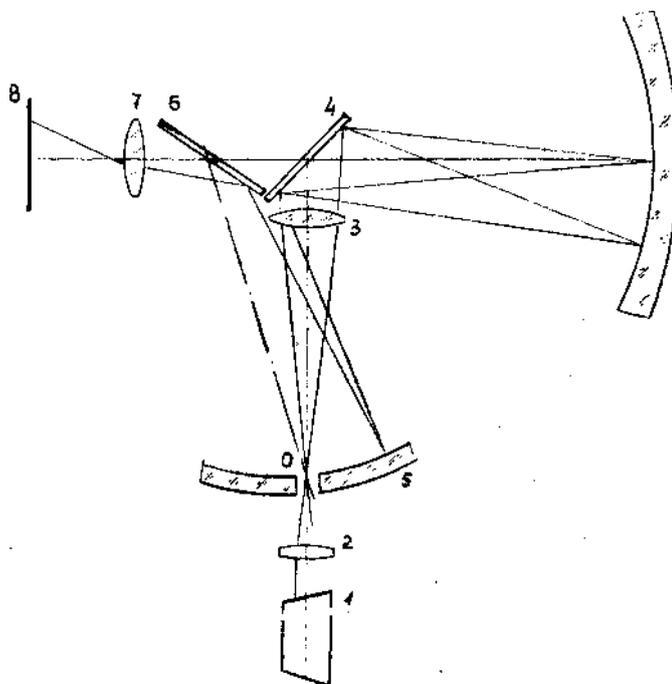


Рис.49 Модифицированная, схема интерферометра с рассеивающей пластинкой

На ЛОМО усовершенствована первоначальная схема интерферометра. В модифицированной схеме (рис. 49) луч лазера 1 фокусируется объективом 2 в точку О в отверстии зеркального коллектива 5. Точка О изображается объективом 3 через отражательную рассеивающую пластинку 4 на поверхность исследуемого зеркала, центр кривизны которого совмещен с осью симметрии рассеивателя. Интерференционная картина строится на поверхности коллектива 5 и через зеркало 6 с объективом 7 изображается в плоскость приемника 8. При этом нерассеянные лучи уходят в отверстие коллектива и в построении интерференционной картины не участвуют. Таким образом устраняется мешающий блик на интерференционной картине. Устранение из схемы светоделительного элемента дает 4-кратный выигрыш в светосиле прибора. Интерферометр нашел применение при исследовании главного зеркала телескопа ЗТА диаметром 2,6 м и ряда других изделий, выпускаемых объединением. Погрешность измерения отклонений формы поверхностей не превышает $\lambda/5 - \lambda/10$.

Принцип изготовления голографических рассеивающих пластин состоит в двукратном экспонировании голографического фотослоя в пучке лазерного излучения через матовое стекло. После первого экспонирования фотопластина

поворачивается вокруг оптической оси пучка на угол 180° с погрешностью порядка $0,5''$. Таким образом, на фотослое регистрируется центрально-симметричная структура. Для схемы интерферометра, работающей в проходящем свете, предпочтительно применение фазовой рассеивающей пластинки типа отбеленной голограммы. При работе на отражение голографическая структура пластинки выполняется рельефной (на хромированном желатине, фоторезисте и т. п.), после чего наносят отражающий алюминиевый слой путем вакуумного напыления.

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСШИФРОВКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ СРЕДСТВАМИ ПРИКЛАДНОЙ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ

Ошибки восстановления волнового фронта при интерферометрических исследованиях в значительной степени определяются погрешностями расшифровки интерферограммы, т. е. измерения положения полосы. Распределение освещенности при двухлучевой интерферометрии является синусообразным по направлению нормали к полосе. Максимум распределения освещенности при этом широк и неудобен для измерений: края полос размыты, наведение на них перекрестия измерительного прибора дает лишь ограниченную точность измерения. Погрешность наведения на полосу может быть существенно уменьшена, если распределение оптической плотности в интерферограмме преобразовать из косинусоидального к виду, показанному на рис.8б, т.е. привести к случаю высокоточной биссекториальной наводки. Такое преобразование изображения (оконтуривание) может быть достигнуто применением фотографического процесса со специфической характеристической кривой (рис. 9). Необходимая форма характеристики получается, как и в изофотометрических исследованиях, путем воспроизведения при обработке фотоматериала эффекта Сабатье. Вид интерферограммы без дополнительной обработки и после оконтуривания показан на рис. 10.

Исследованы погрешности наведения на интерференционные полосы двухлучевых интерферограмм. Измерения производились путем последовательного 20-кратного наведения и вычисления среднеквадратической ошибки. Экспериментально найденные значения погрешностей определения отклонения волнового фронта в процентах от длины волны (λ) приведены в таблице.

Результаты исследования позволили сделать следующие выводы:

1. погрешность расшифровки неоконтуренных интерферограмм возрастает с увеличением ширины полосы;
2. погрешность расшифровки оконтуренных интерферограмм убывает с увеличением ширины полосы;

3. погрешности расшифровки путем наведения на центр и края оконтуренной полосы практически однозначны;

4. применение оконтуривания беззернистой интерферограммы с широкими полосами позволяет уменьшить погрешность расшифровки до 30 раз.

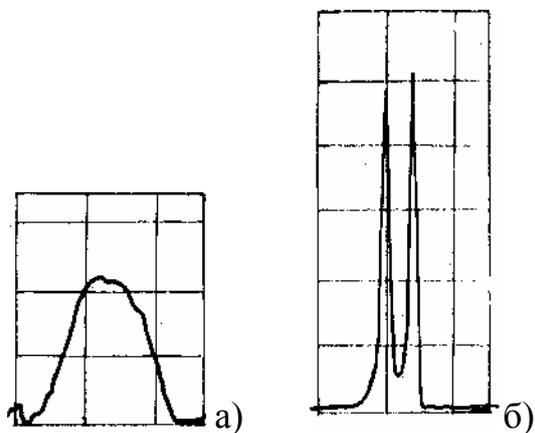


Рис.50. Распределение плотности в ннтерферограмме:
а — без дополнительной обработки; б — после оконтуривания

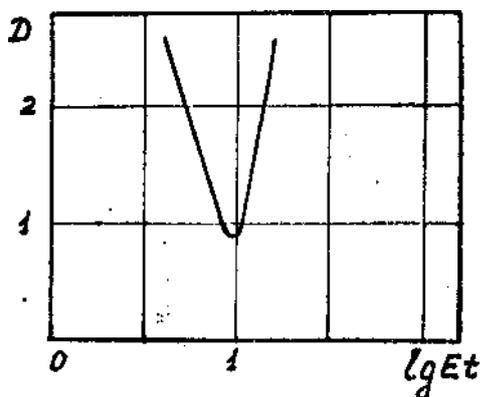


Рис.51. Характеристическая кривая фотоматериала при обработке с эффектом Сабатье

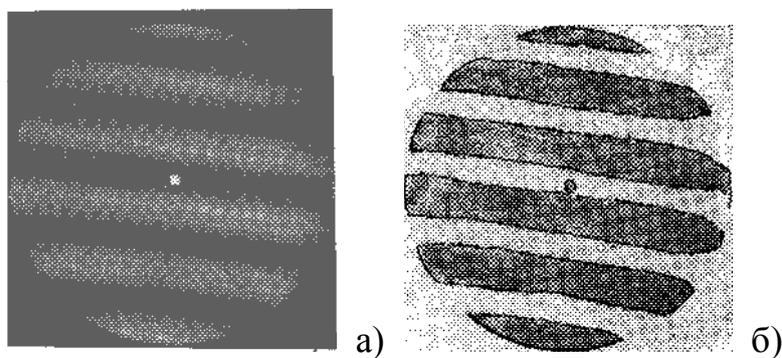


Рис.52. Вид ннтерферограммы:
а - без дополнительной обработки; б — после оконтуривания

Таблица 4. Погрешности расшифровки интерферограмм

Ширина интерференционной полосы, мм	Погрешность расшифровки		
	Без оконтуривания	После оконтуривания	
		Наводка на контур	Наводка на центр
1,0	0,32	0,1	0,11
3,0	1,35	0,05	0,02

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСШИФРОВКИ ГАРТМАНОГРАММ

Развитие методов испытания оптических поверхностей в направлении разработки способов аттестации формы волнового фронта в плоскости зрачка привело к созданию Гартманом своего метода, пригодного для оценки ошибок волновой поверхности по данным, полученным по ряду локальных точек на зрачке. Гартман исходил из геометрической постановки вопроса. Согласно его методу лучи, исходящие из исследуемой системы, изолируются диафрагмами, а далее по экстрафокальным фотографическим снимкам определяются точки, в которых эти лучи пересекают ось. Прерывный пучок лучей, пересекающихся с осью, получают в установке Гартмана, экранируя зрачок исследуемой системы непрозрачным экраном с отверстиями, симметричными относительно центра. Таким образом получают прерывный пучок лучей, пересекающихся с осью.

Точность гартмановского исследования зависит от точности измерения координат точек — следов отверстий экрана, зарегистрированных на фотопластинке. Точки являются дифракционными изображениями, которые тем сильнее размыты и имеют тем больший диаметр, чем меньше отверстия экрана. Кроме того, структура изображения точек на гартманограмме определяется степенью расфокусировки и турбулентностью воздушного тракта, включенного в схему контроля. Последний фактор особенно существенно искажает структуру распределения освещенности, поскольку при гартмановских исследованиях, с целью исключения влияния атмосферы на координаты точек,

время экспозиции при съемках выбирается достаточно большим, чтобы смещения точек из-за атмосферных дрожаний могли осредниться. При этом размывание точки гартманограммы становится весьма значительным. Распределение оптической плотности в пятне при этих условиях аналогично показанному на рис.50,а. Как видно из графика, пограничные участки кривой пологие, градиент распределения плотности невелик. Исследованиями было показано, что погрешность наведения на точку гартманограммы тем значительнее, чем ниже градиент плотности. Погрешность наведения для гартманограммы, полученной от звезды, при средних атмосферных условиях лежит в интервале 26—40 мкм при допустимой величине не более 12 мкм для схемы контроля крупного астрономического зеркала.

Предлагаемый способ повышения точности измерения при исследовании оптической системы по методу Гартмана состоит в повышении чувствительности наводок путем придания изображению точки гартманограммы кольцеобразной формы. Здесь мы имеем случай, близкий к широко применяемой на практике биссекториальной наводке, чувствительность которой не менее чем в 5 раз превышает ту, которая может быть достигнута для распределения освещенности колоколообразного типа, рассмотренного выше. Преобразование структуры точки из колоколообразной (рис.50, а) в кольцеобразную (рис. 50,б) достигается применением способа оконтуривания с использованием фотографического эффекта Сабатье. Оценка погрешностей измерения координат точек, производившаяся путем определения среднеквадратичного отклонения серии последовательных наводок, показала, что применение метода оконтуривания для направленной трансформации структуры изображений точек гартманограммы позволяет снизить погрешность измерений по методу Гартмана от звезды с 4 до 20 раз. Аналогичный эффект может быть получен и при цеховых исследованиях систем методом Гартмана в условиях значительных воздушных потоков и вибраций в схеме контроля.

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ГАРТМАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРА

Исследования крупногабаритных оптических систем, например астрономических, в процессе их изготовления и аттестации в цехе обычно проходят в условиях трудноустраняемых вибраций в схеме контроля. При исследованиях методом Гартмана вибрации приводят к быстрым синхронным перемещениям пятен гартмановской картины. За время экспозиции гартманограммы, которое при использовании обычного теневого прибора с накальной или ртутной лампой доходит до нескольких минут, световые пятна многократно перемещаются по поверхности эмульсионного слоя по случайному закону, что приводит к сильному увеличению диаметра изображения пятна и размыванию его очертаний. В результате при наличии вибраций в

цеховых условиях часто не удается получить гартмановский снимок, пригодный к расшифровке, т. е. содержащий уверенно различимые пятна.

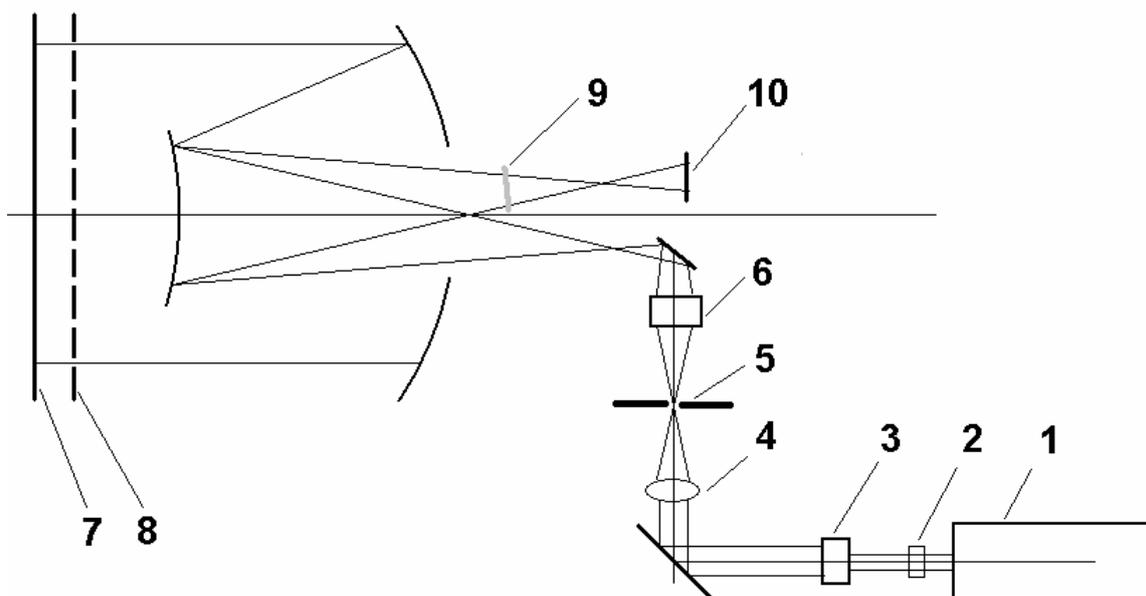


Рис.53. Схема контроля оптического телескопа методом Гартмана с лазером

Разработанная установка для получения гартманограмм с использованием лазера позволяет на 5 порядков сократить длительность экспозиции при съемке гартманограмм и создать условия для получения в условиях вибрации таких гартманограмм, четкость пятен на которых определяется только дифракцией на отверстиях экрана (диафрагмы Гартмана). Схема установки показана на рис. 53. Луч гелий-неонового лазера 1 (например, типа ОКГ-11), пройдя расширительную линзу 2 (около 5 диоптрий) и затвор 3, фокусируется объективом 4 в плоскость круглой точечной диафрагмы 5, которая микрообъективом 6 проектируется в фокальную плоскость исследуемой системы (точка Р). При работе в автоколлимации от контрольного плоского зеркала 7 на зрачок системы, совпадающий с главным зеркалом системы (исследуется система астрономического телескопа), приходят параллельные световые пучки, вырезанные в волновом фронте отверстиями диафрагмы Гартмана 8. Кассета с фотопластинкой устанавливается последовательно во внефокальных положениях 9 и 10, где на поверхности фотоэмульсии формируются изображения световых пятен, определяемые, как указано выше, расположением отверстий в диафрагме и удвоенными ошибками системы, если пренебрежимо малы ошибки контрольного зеркала и юстировки.

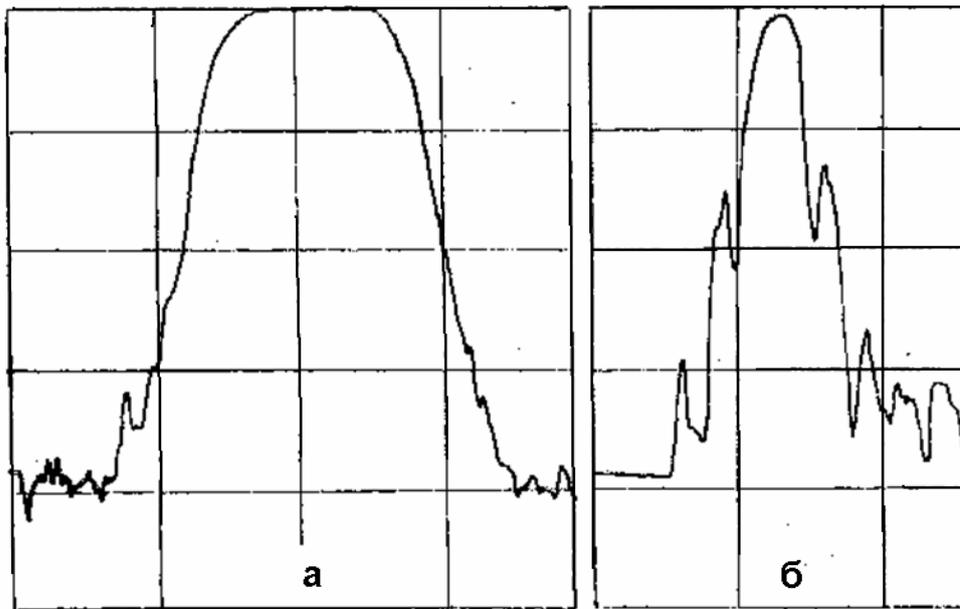


Рис. 54. Микрофотометрическая структура пятна гартманограммы: а — при длительной экспозиции; б — в схеме с лазером

Использование в данной схеме лазерного источника дает возможность сформировать весьма яркий точечный источник, что в свою очередь позволяет получить на фотоматериале освещенности, при которых для съемки гартманограмм достаточны экспозиции, по длительности не превышающие 10^{-3} с. При столь коротких выдержках «смазывание» изображений пятен гартманограммы исключается и пятна изображаются в виде дифракционных кружков с четко очерченными центральными максимумом и кольцом.

На рис. 54,а показана микрофотометрическая структура пятна гартманограммы при длительной экспозиции, на рис. 54,б — при использовании установки по предложенной схеме. Исследовалась оптическая система телескопа АЗТ-11 с главным зеркалом диаметром 1,25м, изготовленного на ЛОМО для Абастуманской астрофизической обсерватории.

При получении гартманограмм использовались фотопластинки «Изопанхром» мягкие 130 ед. ГОСТ». Время экспозиции в первом случае составило 1,8 мин, во втором, при использовании предложенной схемы с лазером, — 1/1000 с.

Из результатов микрофотометрирования видно, что пятно гартманограммы, полученной предложенным способом, значительно компактнее и характеризуется более высоким краевым градиентом освещенности, из чего, как было рассмотрено выше, однозначно вытекает более высокая точность расшифровки результатов измерений. Кроме того, существенно снижается трудоемкость регистрации и измерений, облегчается юстировка измерительной схемы, улучшаются условия труда и надежность контроля.

Как показала практика, предложенный способ дает единственный путь проведения измерений по Гартману для оценки сложных астрономических систем в реальных условиях при наличии значительных вибраций в схеме контроля.

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ ПРИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Влияние вибраций, неизбежно присутствующих в условиях действующего оптико-механического производства, затрудняет применение интерферометрии и снижает ее эффективность. Виброперемещения исследуемого оптического элемента и образцовой детали, связанные с нежесткостью конструкции интерферометра, влекут за собой периодическое изменение оптической разности хода в рабочем и образцовом плече интерферометра. Это приводит к перемещению интерференционной картины. Так, смещение исследуемой поверхности на $\lambda/2$ вызывает сдвиг интерференционной картины на одну полосу..Общее перемещение системы полос составляет:

$$N = 2L_{\Pi} / \lambda,$$

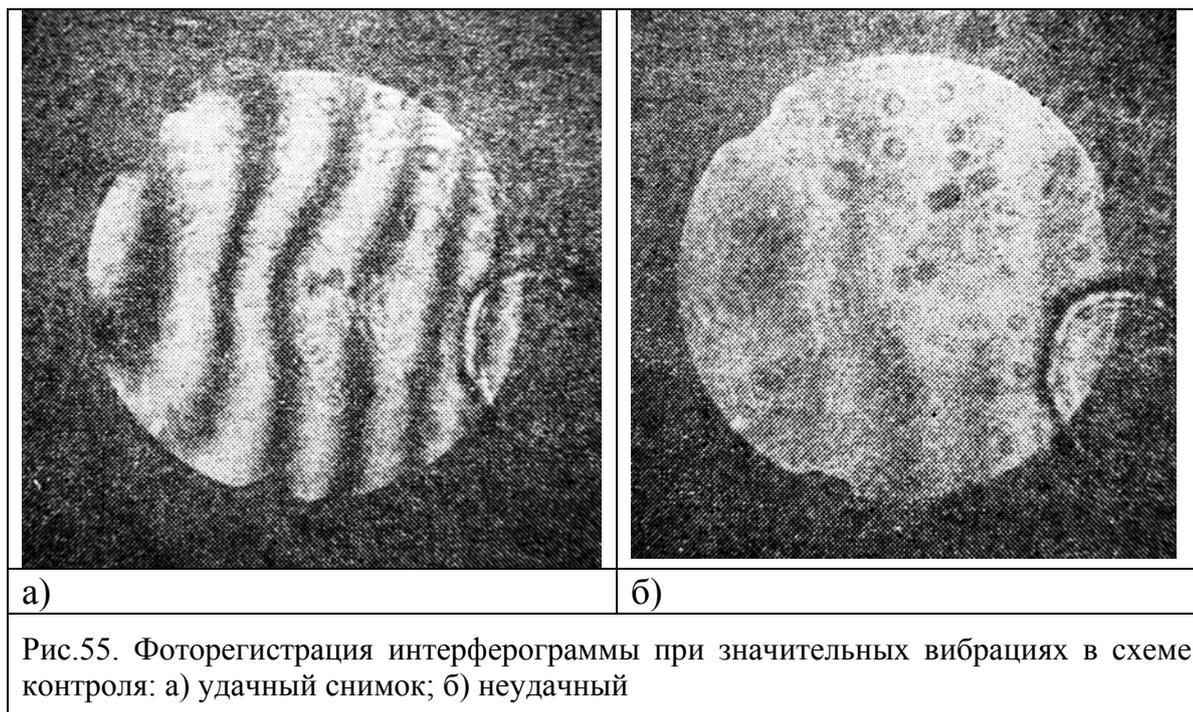
где N – число полос, на которое смещается интерференционная картина, L_{Π} - перемещение исследуемой поверхности.

Таким образом, если при экспозиции интерференционной картины за время регистрации она сместится на половину периода полосы, то светлые полосы наложатся на темные промежутки, что приведет к снижению или исчезновению контраста. Таким образом, виброперемещение исследуемой поверхности за время экспозиции интерферограммы на величину $\lambda/4$ при частоте вибрации от 16 с^{-1} и выше делает визуальный интерференционный контроль невозможным, так как эффективный контраст становится нулевым и интерференционная картина не видна несмотря на то, что номинально она сформирована.

Естественно, что и вдвое меньшее смещение $\lambda/8$ приведет к размытию интерференционной картины и существенно повысит погрешности расшифровки координат положения полос. При использовании лазера с длиной волны 632.8 нм виброперемещение исследуемой поверхности не должно превышать 0.1 мкм.

Практикой цеховых интерференционных исследований установлено, что в условиях производства доступные средства виброзащиты (виброизолирующие столы и платформы) не позволяют полностью избежать значительных по частоте и амплитуде колебаний интерференционной картины. Однако эти колебания нерегулярны и в процессе наблюдения встречаются краткие мгновения, когда интерференционная картина стабилизируется. В этих условиях многократная фоторегистрация с выдержками 0.004 – 0.001 с позволяет, анализируя покадрово результаты регистрации, выбрать из ряда

кадров отдельные снимки приемлемого качества, пригодные к дальнейшей обработке и интерпретации [8].



Такая технология, ставшая традиционной, существенно упрощается с появлением и развитием цифровой фотографии. Устранение операций химико-фотографической обработки радикально упрощает и ускоряет процесс просмотра зарегистрированных изображений и отбора оптимальных кадров, которые могут быть немедленно введены в компьютер для дальнейшей обработки. Дополнительные возможности создает возможность использования режима видеосъемки с частотой 16 – 24 кадра в секунду. Таким режимом оснащены сегодня практически все модели цифровых фотокамер общего назначения.

Следует отметить, что предлагаемый метод серийной фоторегистрации тем более эффективен, чем короче длительность экспозиции каждого кадра при фоторегистрации. Оптимальным можно считать соблюдение условия съемки, при котором длительность экспонирования одного фотокадра на порядок меньше периода колебания изображения при вибрации. В случае, когда время экспонирования кадра соизмеримо с периодом виброперемещений интерференционных полос, возникает опасность ложных искривлений полос, не связанных с исследуемыми ошибками волнового фронта, что, естественно, приводит к дополнительным погрешностям. С другой стороны, при соблюдении указанного условия, метод серийной скоростной регистрации интерференционной картины является эффективным *дополнительным* средством устранения вредного влияния вибраций при интерферометрии, причем *основным* средством здесь является виброизолированная платформа,

например, интерферометрический стол, ввешенный на накаченных автомобильных камерах.

ИНТЕРФЕРОМЕТР С РЕШЕТКОЙ РОНКИ

Принцип метода

Принцип действия интерферометра состоит в наложении и интерференции двух взаимно когерентных сферических волновых фронтов в режиме интерференции сдвига (Табл. 5).

Сферическая волна, сформированная исследуемой оптической системой, имеющая центр кривизны в точке P , падает на линейную решетку R , установленную нормально к оптической оси вблизи плоскости фокусировки тест-объекта. Решетка имеет пространственную частоту m и отстоит от центра кривизны сферической волны на расстояние y .

Это расстояние считается положительным, если отсчет производится в направлении, обратном направлению распространению света. При этом по обеим сторонам от точки P образуются дифракционные спектры различных порядков, имеющие для монохроматического света вид точек. Расстояние между спектрами для малых углов дифракции равно

$$d=y\beta \quad (1)$$

где β - угол дифракции.

$$\beta=m\lambda \quad (2)$$

Отсюда

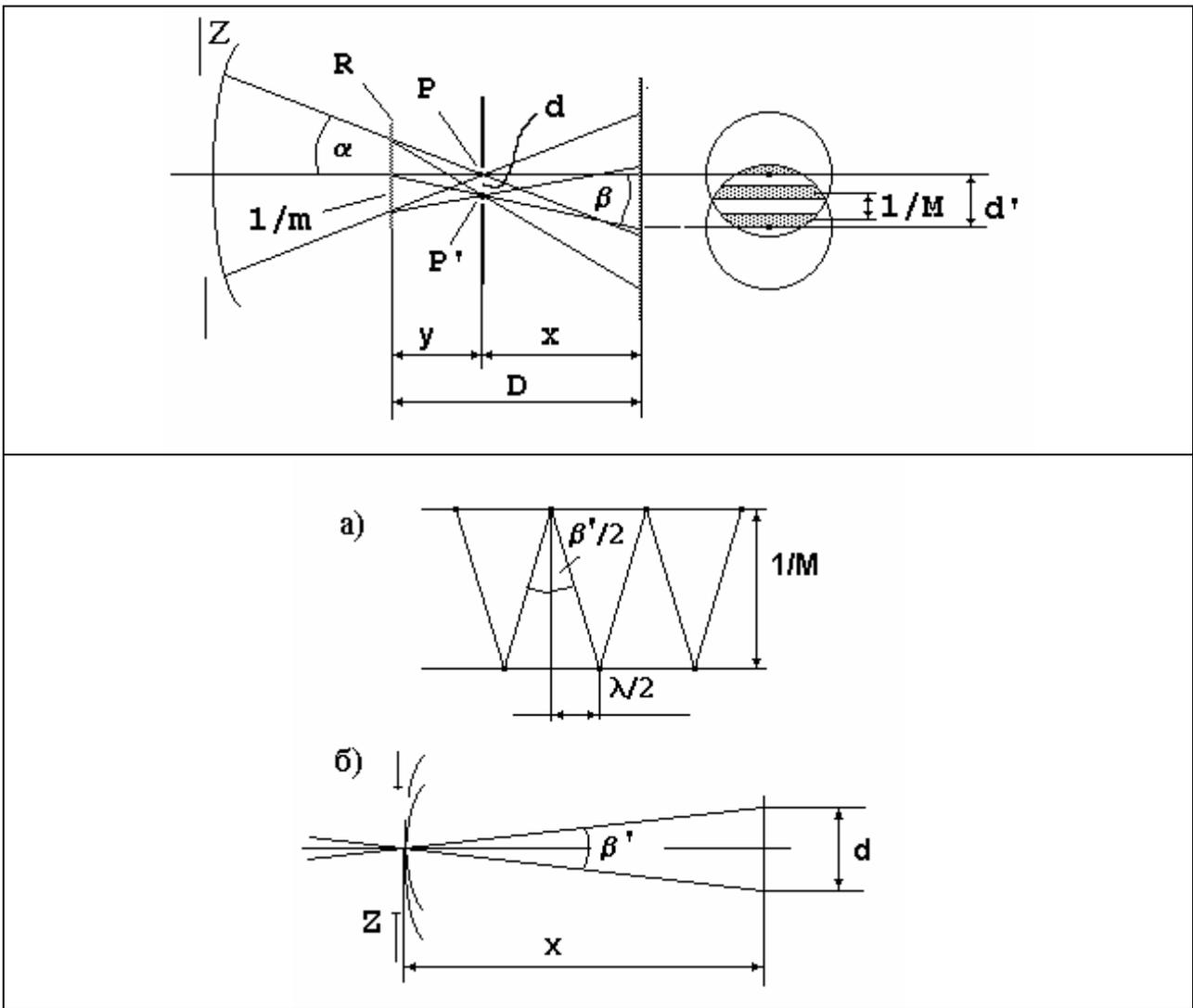
$$d=ym\lambda \quad (3).$$

Итак, решетка порождает ряд дифрагированных волн. Диафрагмой выделим из всей совокупности дифрагированных фронтов только два соседних фронта, повернутых на угол β и смещенных на расстояние d один относительно другого.

После концентрации в точках P и P' сферические фронты расходятся, образуя в той области пространства, где они перекрываются с заклоном на угол β' , интерференционные полосы.

(Под углом β' наблюдаются дифракционные спектры P и P' из центра зрачка Z исследуемой оптической системы).

Таблица 5. Принцип действия интерферометра с решеткой Ронки



$$\beta' = d/x \quad (4).$$

Расстояние между интерференционными полосами (шаг интерференционных полос) составляет

$$1/M = \lambda/\beta' \quad (5)$$

$$1/M = \lambda x/d \quad (6)$$

Имея в виду, что

$$d = ym\lambda,$$

находим, что

$$1/M = \lambda x / ym\lambda;$$

$$1/M = x/my.$$

Отсюда получаем соотношение:

$$M/y = m/x. \quad (7)$$

Физический смысл сокращения величины λ очень интересен. Он состоит в том, что работа данного интерферометра сочетает явления как интерференции, так и дифракции. При дифракции (3) *увеличение* длины волны λ влечет за собой *увеличение* расстояния d между спектрами, как видно из формулы (3). Это соответствует *увеличению* угла взаимного заклона дифрагированных фронтов β' и должно было бы сопровождаться увеличением частоты интерференционных полос (5).

Однако в процессе *интерференции* дифрагированных фронтов, наложенных под углом β' , то же *увеличение* λ влечет за собой, как видно из выражения (6), пропорциональное *уменьшение* частоты полос, соответствующих той же величине деформации (в данном случае заклона) волнового фронта. В итоге частота интерференционных полос в интерферометре Ронки (для ахроматической исследуемой системы) не зависит от длины волны излучения, а связана лишь с частотой решетки и геометрическими соотношениями в схеме, что, при небольших апертурах исследуемых систем, позволяет описывать механизм формирования полос Ронки просто теньвым отображением штрихов решетки (рис.56). Это же позволяет вести исследования интерферометре данного типа с применением источника белого света.

При наличии продольного хроматизма или сферохроматизма в исследуемой системе наблюдается окрашивание интерференционных полос, полученных в белом свете. Это объясняется изменением длины отрезка y для разных длин волн при указанных аберрациях. Это свойство данного интерферометра позволяет использовать его при исследованиях хроматизма.

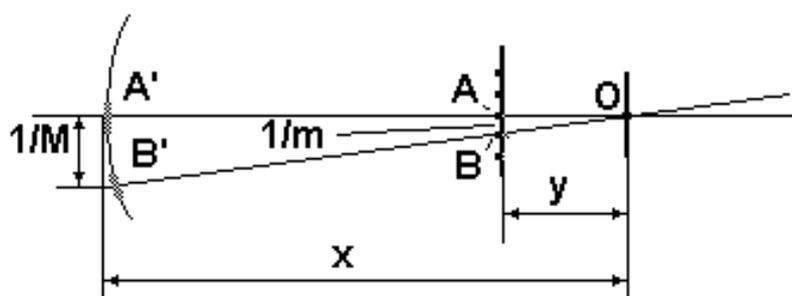


Рис.56. Частота интерференционных полос связана с частотой решетки

Итак, частота интерференционных полос связана с частотой решетки соотношением:

$$M = m\gamma/x. \quad (8)$$

При отсутствии деформаций наложенных фронтов эти полосы прямолинейны, параллельны и отстоят друг от друга на равные промежутки .

Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения и интерференции сдвига рабочей волны, раздвоенной в результате дифракции на решетке и несущей информацию об aberrациях исследуемой оптической системы.

Характеристики установки для исследования объектива микроскопа

1. Источник света - лампа накаливания с набором монохроматических светофильтров ($\lambda_1=546.07$ нм, $\lambda_2=656.27$ нм).
2. Образцовая поверхность – отсутствует.
3. Установка собрана на базе биологического микроскопа "Биолам"
4. Частота линейной решетки 12.5 лин/мм.
5. Задний рабочий отрезок микрообъектива $x=140$ мм.

Схема установки

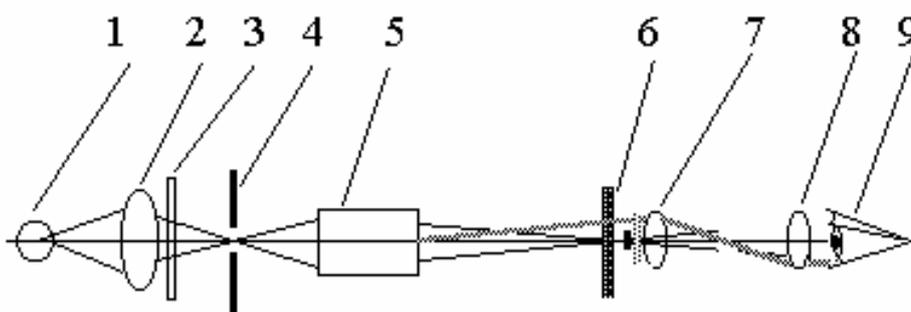


Рис.57. Схема установки для исследования объектива микроскопа

1 - лампа	6 - дифракционная решетка
2 - конденсор	7 - объектив наблюдательной системы
3 - светофильтр	8 - окуляр наблюдательной системы
4 - точечная или щелевая диафрагма	9 - глаз наблюдателя
5 - исследуемый микрообъектив	

Проведение исследований

Получить интерферограммы поочередно от 2 -х объективов.

Для этого:

1) Используя в микроскопе окуляр, сначала фокусируются на тест-объект (точечный препарат), помещенный на предметный столик микроскопа; находят вертикально расположенный светлый штрих, который материализует тест-объект "светящаяся линия"; подвижками столика приводят тест-объект в центр поля.

2) Заменяют окуляр на вспомогательный микроскоп (трубку Мир-4) и фокусируются на выходной зрачок исследуемого микрообъектива. Фокусировкой вспомогательного микроскопа находят положение, при котором в зрачке наблюдается система параллельных темных полос на светлом фоне. При недостаточном контрасте полос необходимо повернуть трубку Мир-4 в тубусе микроскопа так, чтобы направление штрихов решетки также стало вертикальным и совпало с направлением тест-объекта "светящаяся линия". Число интерференционных полос можно менять с помощью продольных подвижек тубуса микроскопа.

3) По виду интерференционной картины оценить характер aberrаций исследуемого микрообъектива (рис.61).

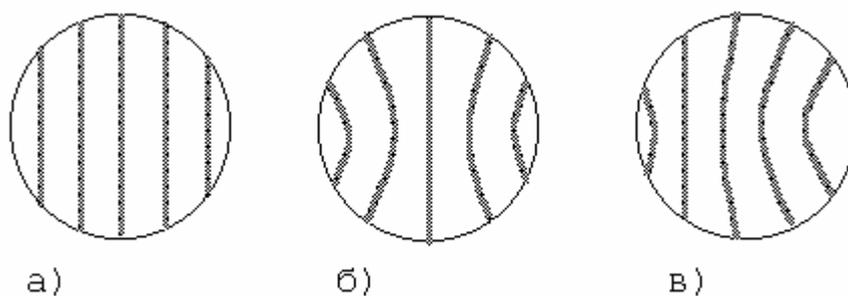


Рис. 58. Форма интерференционной картины Ронки в зависимости от характера aberrаций: а) отсутствие aberrаций; б) сферическая aberrация; в) кома

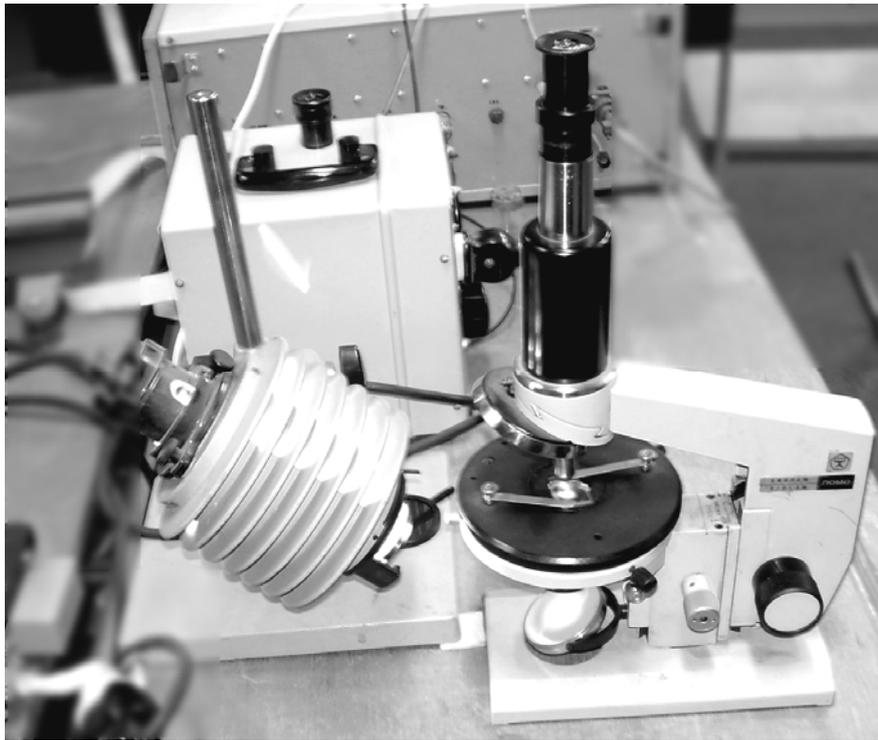


Рис. 59. Интерферометр Ронки для исследования ахроматических и хроматических aberrаций микрообъективов

4) Сопоставить характер и количественную оценку aberrаций данного микрообъектива, наблюдаемые на интерферометре Ронки, с характером и величиной aberrаций того микрообъектива, определяемые параллельно на лазерном интерферометре с дифрагированной опорной волной (лабораторная работа N3).

5. Измерить частоту интерференционных полос по среднему сечению картины Ронки в двух длинах волн и рассчитать хроматическую разность для исследуемого микрообъектива.

Имея в виду, что (7)

$$M/y = m/x,$$

значение y составит

$$y = Mx/m,$$

где M - частота интерференционных полос в зрачке исследуемого микрообъектива (для диаметрального сечения).

Для двух исследуемых длин волн имеем

$$y_{\lambda_1} = M_{\lambda_1} x / m,$$

$$y_{\lambda_2} = M_{\lambda_2} x / m.$$

Хроматическая разность методом в интерферометре Ронки определяется как

$$\Delta y_{\lambda} = y_{\lambda 1} - y_{\lambda 2}$$

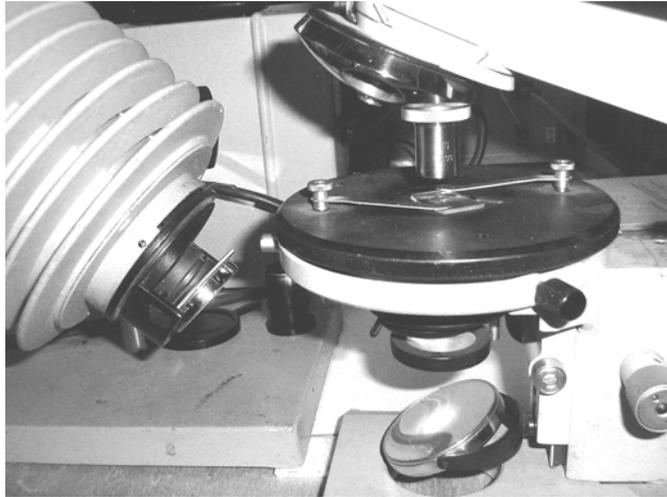


Рис. 60. Точечный препарат на предметном столике интерферометра по схеме Ронки содержит субмикронную щель, применяемую для формирования тест-объекта “светящаяся линия”

Методика проведения измерения

- а) измерить величину $d_{\text{зм}}$ - диаметр зрачка исследуемого микрообъектива.
- б) Наблюдая интерферограмму, сосчитать число полос $n_{\text{ип}}$ (с долями), по диаметру изображения зрачка (до раздвоения справа).
- в) Определить частоту M полос интерферограммы как

$$M = n_{\text{ип}} / d_{\text{зм}}$$

При определении хроматизма

<i>измеряется</i>	<i>определяется</i>
$n_{\text{ип}} \lambda_1$	M_{λ_1}
$n_{\text{ип}} \lambda_2$	M_{λ_2}

- г) Если оптимальная по контрасту интерферограмма содержит малое количество полос (3 - 4 полосы), то величина M надежнее определяется по следующей методике:

$$M = 1/T_p \text{ (1/мм),}$$

где T_p - период полос в параксиальной зоне интерферограммы;

$$T_p = (p_1 - p_2) V_c, \text{ (мм);}$$

где p_1 и p_2 - координаты двух центральных полос в числе делений окулярной шкалы вспомогательного микроскопа МИР-1.

V_c - цена деления окулярной сетки, отнесенная к зрачку исследуемого микрообъектива.

$$V_c = d_{зм} / n_{ш} \text{ (мм);}$$

где $d_{зм}$ - измеренный ранее диаметр зрачка исследуемого микрообъектива (мм),
 $n_{ш}$ - число делений окулярной сетки, соответствующее диаметру изображения зрачка на сетке;

$$n_{ш} = p_{31} - p_{32},$$

где p_{31} и p_{32} - соответственно координаты правого и левого края изображения зрачка на окулярной сетке.

д) Хроматическая разность определяется как

$$\Delta y_\lambda = (x/m) (M_{\lambda 1} - M_{\lambda 2})$$

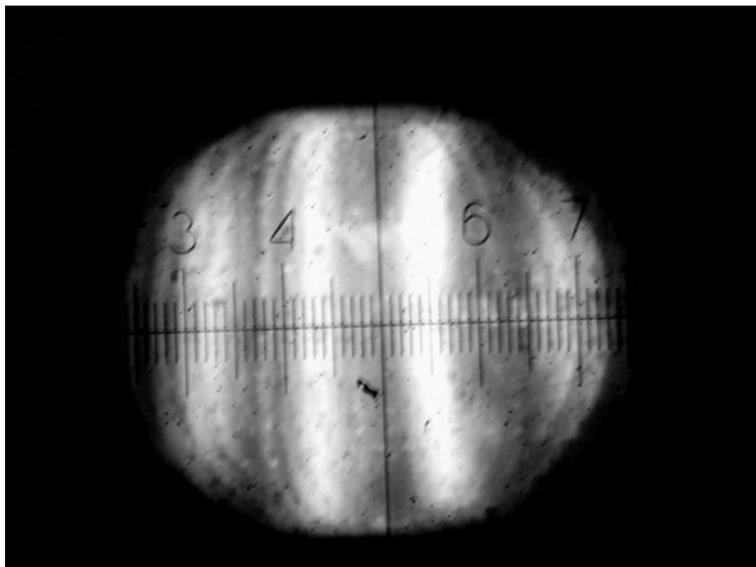


Рис.61. Интерферограмма Ронки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение совокупности работ позволяет наметить некоторые основные направления повышения качества контроля оптических систем в условиях производства:

1. Внедрение новых принципов построения методов и средств контроля, открывающих возможности получения измерительных данных, недостижимых традиционными средствами и методами. Примерами могут служить метод изофотометрической фоторегистрации и интерферометр с рассеивающей пластинкой.

2. Применение современных средств приема и регистрации изображения, позволяющих фиксировать и подвергать всестороннему анализу большие объемы измерительной информации, на много превышающие возможности непосредственного человеческого восприятия. Особую, все возрастающую роль играют взаимодополняющие друг друга средства специальной фоторегистрации и прикладного телевидения.

3. Использование современных достижений в области обработки изображений и ввода графической информации в ЭВМ для количественного анализа. Как видно из опыта повышения точности метода Гартмана и интерференционного метода, здесь имеются большие резервы снижения погрешностей измерений при одновременном уплотнении измерительной информации, значительной экономии машинного времени ЭВМ.

4. Широкое применение ЭВМ при обработке измерительных данных создает условия для наиболее полного их использования при технологическом контроле и аттестации оптических систем. При этом резко возрастает производительность на операциях контроля, которые с повышением точности выпускаемой оптики требуют все большего времени и трудозатрат.

5. Широкое использование средств лазерной техники и голографии, открывающих пути развития новых методов и оптико-измерительных систем, усовершенствования традиционных систем и методов.

Что касается перспектив развития средств оптического контроля, то представляется, что будущее принадлежит информационным оптико-измерительным комплексам, которые станут мощным связующим звеном между технологическим оборудованием и управляющими ЭВМ в автоматических системах управления технологическими процессами производства оптических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.А.. Оптические измерения. Под. ред. проф. Д.Т. Пуряева. М. Высшая школа. 1981.
2. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М. Машгиз. 1978.
3. Линник В.П. Простой интерферометр для исследования оптических систем. Труды ГОИ. Том X. Выпуск 95. Ленинград. 1934.
4. Максутов Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.Наука. 1984.
5. Духопел И. И., Федина Л. Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей. – ОМП, 1973, №8.
6. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М. Машиностроение . 1987.
7. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М. Машиностроение. 1995г.
8. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение. 1984.
9. Лившиц Э.М. Оптические измерения. Учебное пособие. Л. ЛИТМО. 1985.
10. Порохова Т.Г. Конспект лекций по курсу “Оптические измерения ”, ч.1-3. Учебное пособие. Л. ЛИТМО. 1974-75.
11. Кирилловский В. К., Петрученко И. Р. Контроль оптических систем с применением лазеров. Учебное пособие. – Л., ЛИТМО, 1986.
12. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. Л. ЛИТМО. 1990.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБ ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОШИБОК ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	5
ТЕНЕВОЙ МЕТОД ФУКО	5
МЕТОД ГАРТМАНА.....	5
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ	7

Таблица 1	9
ИНТЕРФЕРОМЕТР ТВАЙМАНА.....	9
ИНТЕРФЕРОМЕТР ФИЗО.....	11
КОНТРОЛЬ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	11
КОНТРОЛЬ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	12
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.....	14
ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА.....	18
ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАГИРОВАННЫМ ЭТАЛОННЫМ (ОПОРНЫМ) ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ, НЕ ТРЕБУЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАЗЦОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	22
ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИЕЙ НА ТОЧЕЧНОМ ОТВЕРСТИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОШИБОК ФОРМЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	23
ИНТЕРФЕРОМЕТР Линника	24
НЕРАВНОПЛЕЧИЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР	25
ОТНОСИТЕЛЬНО ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ ДИФРАГИРОВАННОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА	28
ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.....	32
АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	37
ВЫСОКОТОЧНАЯ ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ.....	41
УНИФИЦИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОЙ АСТРООПТИКИ.....	48
НАЗНАЧЕНИЕ	48
УСТРОЙСТВО И РАБОТА ИНТЕРФЕРОМЕТРА	49
<i>Принцип действия и оптическая система</i>	49
ПОРЯДОК УСТАНОВКИ И ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ	51
МЕТОДИКА РАБОТЫ НА ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ	51
МЕТОДИКА ОКОНТУРИВАНИЯ ИНТЕРФЕРОГРАММ.....	54
МЕТОДИКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПК-881-00.000	55
АТТЕСТАЦИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА	55
ЛИТЕРАТУРА ПО ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ БЕЗЭТАЛОННОГО НЕРАВНОПЛЕЧЕГО ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА С ДИФРАГИРОВАННЫМ ОПОРНЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ	56
АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	62
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИНТЕРФЕРОГРАММ... 66	66
КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ.....	66

ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ.....	67
ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ	67
ПРОГРАММА ZEBRA IMAGER	71
ИНТЕРФЕРОМЕТР С РЕШЕТКОЙ РОНКИ	91
ПРИНЦИП МЕТОДА	91
ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТИВА МИКРОСКОПА ..	94
СХЕМА УСТАНОВКИ.....	94
ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	95
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ	97

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.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. Грамматиним (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 аберраций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);
- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманогаммы 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

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 5.

Абберрации и качество изображения.

В авторской редакции и компьютерной верстке

Зав редакционно-издательским отделом СПб ГИТМО(ТУ) Н.Ф.Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано к печати 15.06.06

Отпечатано на ризографе. Тираж 300 экз. Заказ №812



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