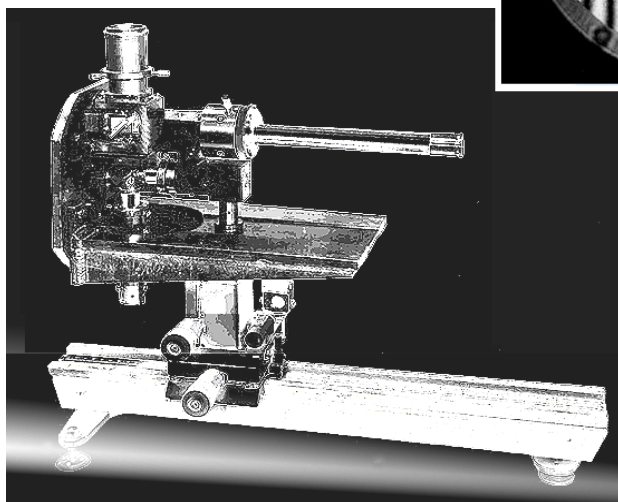


В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 5. Аберрации и качество изображения

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Санкт-Петербург
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 5. Аберрации и качество изображения
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 12.03.02, 16.03.01 и 12.04.02 в качестве
учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования
бакалавриата и магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2019

Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 94 с.

Рецензент:

Мусалимов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

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 в современных условиях производства и научно-технических исследований. Рассмотрены анализ и синтез схемных решений аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей, а также современные косвенные методы оценки качества изображения оптических систем путем компьютерной расшивки интерферограмм.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 12.03.02 «Оптехника» и 16.03.01 «Техническая физика» в рамках дисциплины «Оптические измерения» и направлению подготовки магистрантов 12.04.02 «Оптехника» в рамках дисциплины «Методы исследования и контроля качества оптических систем», а также может быть полезным для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и для технологов оптического производства.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019
© Кирилловский В.К., Точилина Т.В., 2019

ВВЕДЕНИЕ

В пособии рассмотрено 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.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 12.03.02 «ОпTOTехника» и 16.03.01 «Техническая физика» в рамках дисциплины «Оптические измерения». Цель дисциплины «Оптические измерения» – освоение обучающимися теоретических, практических и метрологических основ классических и современных оптических измерений.

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.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистрантов 12.04.02 «ОпTOTехника» в рамках дисциплины «Методы исследования и контроля качества оптических систем», а также для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и для технологов оптического производства в пособии рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с абберациями 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 aberrаций и качества изображения.

Сложный процесс создания современной оптической системы может быть разделен на два этапа: проектирование и изготовление. На первом этапе производится 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 путями. 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 косвенным путем – при математической обработке данных о форме волнового фронта, сформированного в зрачке исследуемой системы. 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 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 [1]. 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 нанолитографии, 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 (рис. 1) считался чисто качественным. Однако в последние годы появились работы, направленные на получение количественных оценок ошибок системы по данным испытаний теневым методом. К достоинствам теневого метода относятся следующие:

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

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

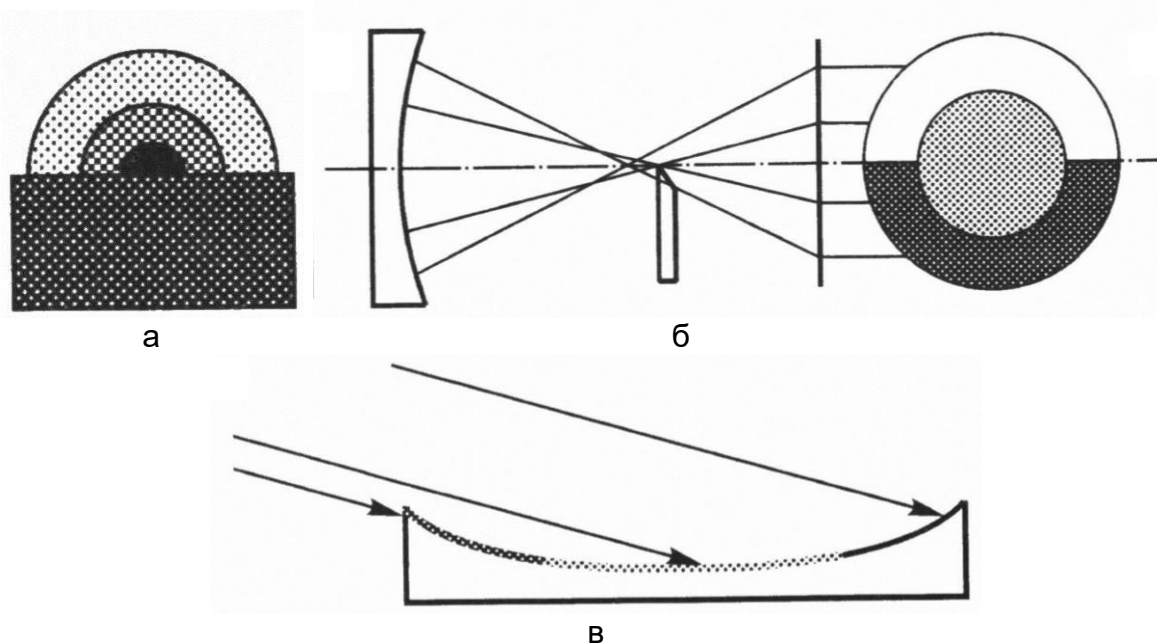


Рис. 1. Принцип теневого метода Фуко: «нож Фуко» (а); наблюдение теневой картины в плоскости экрана, расположенной за пятном рассеяния (б); источник света, помещенный у противоположного «ножу» края поверхности деформаций волнового фронта (в)

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 (рис. 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 aberrаций оптической системы, что позволяет оценивать оптическую систему на соответствие расчету. Метод прост в реализации.

В противоположность теневому, метод Гартмана обеспечивает количественный характер исследования aberrаций, однако не обеспечивает наглядности, и рассмотрение гартманогаммы aberrационно скорректированной 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.

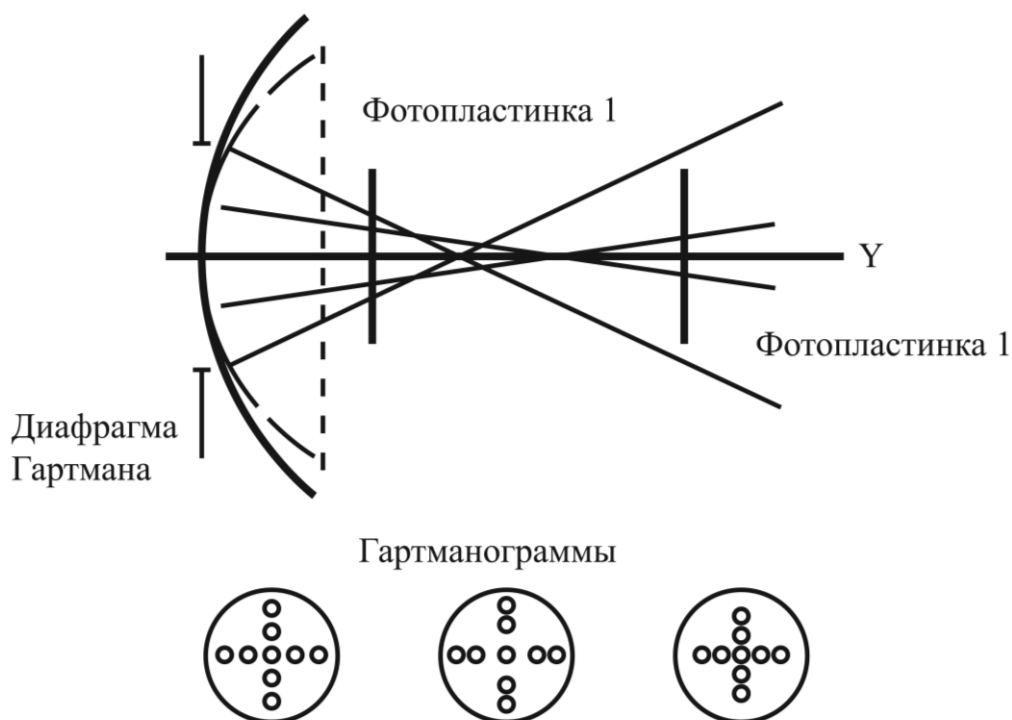


Рис. 2. Схема измерения aberrаций методом Гартмана

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.

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. Другими словами, речь шла об интерферометрическом методе, когда проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны (рис. 3, а) [2].

Особое преимущество интерферограммы состоит в том, что при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте (рис. 3, б) исследуемой волновой поверхности, где изолинии уровня (горизонталы) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны.

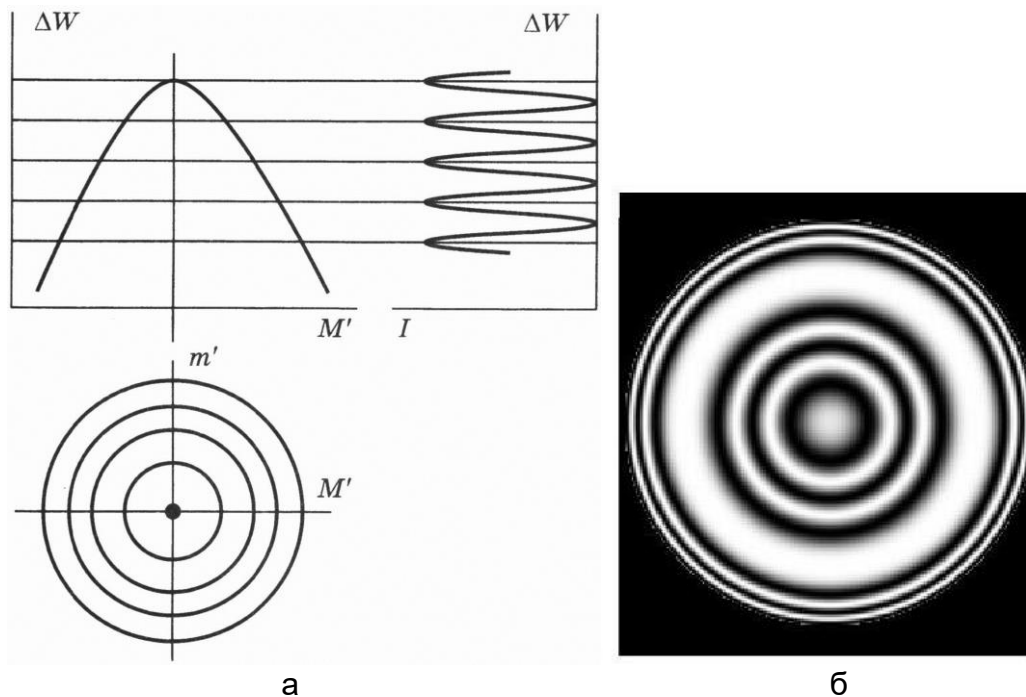


Рис. 3. Схема метода интерферометрии для варианта точной продольной и поперечной настройки интерферометра (а); вид интерферограммы (б)

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 (рис. 4).

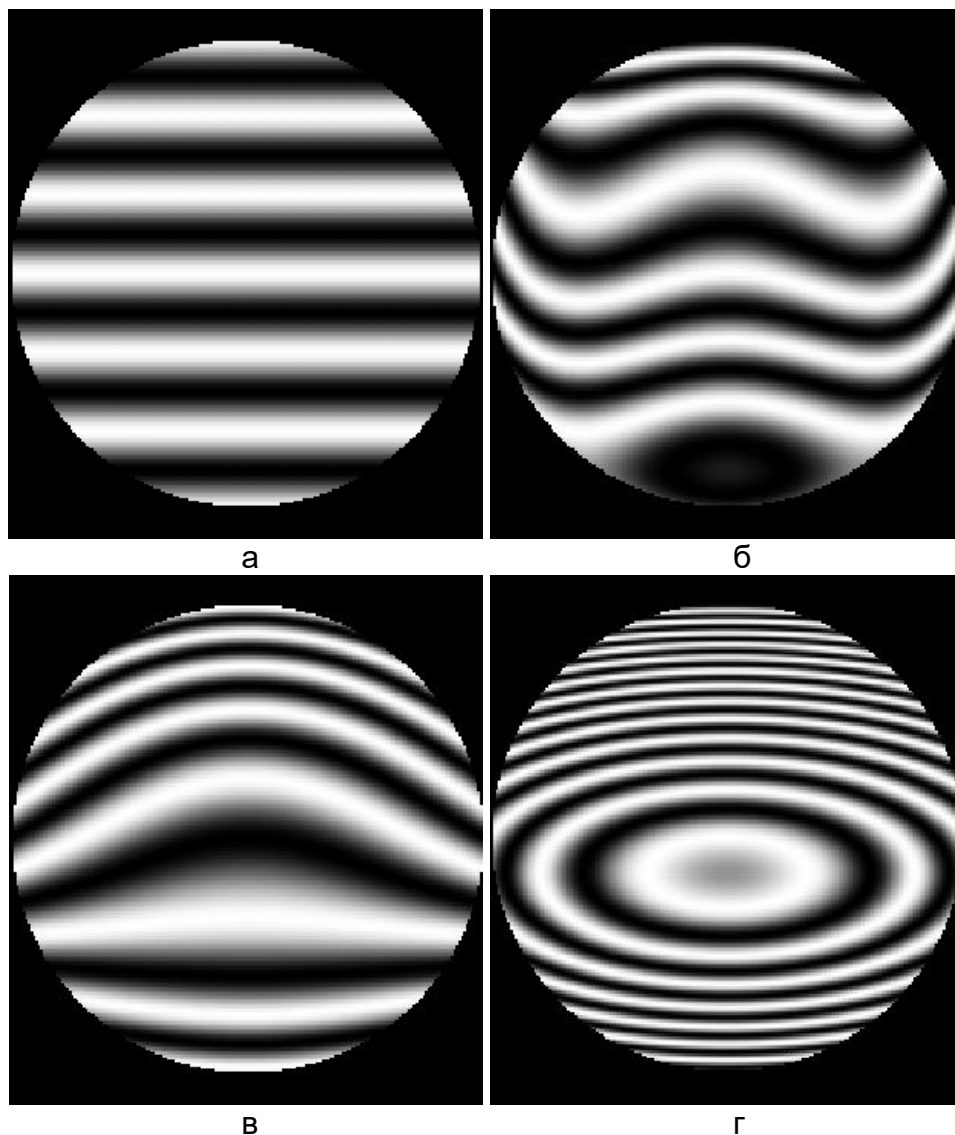


Рис. 4. Вид интерференционных картин для круглого зрачка: отсутствие aberrаций (а); сферическая aberrация (б); кома (в); астигматизм (г)

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 программы автоматического ввода графиков в компьютер. Например, каждая интерференционная полоса синусоидальной структуры трансформируется в пару четких контуров (рис. 5).

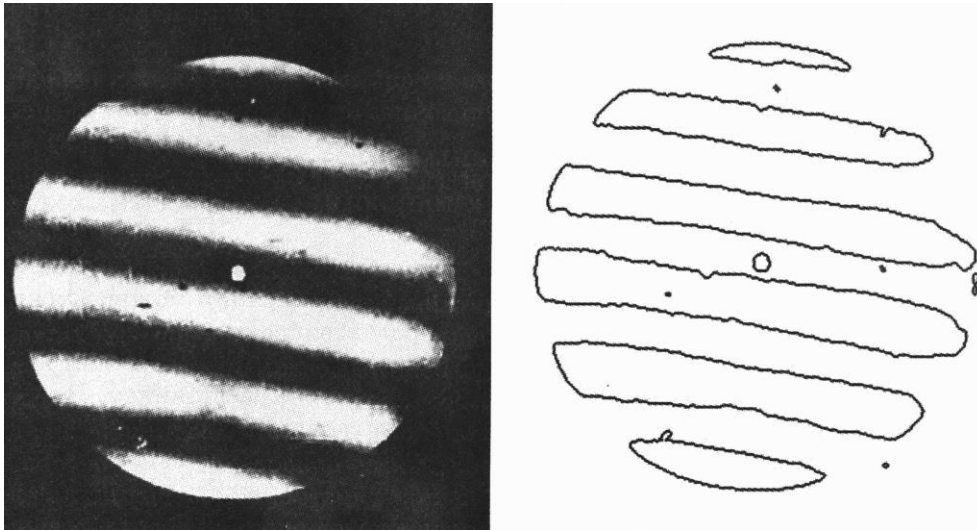


Рис. 5. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности расшифровки интерферограммы

ИНТЕРФЕРОМЕТР ТВАЙМАНА

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. 6.

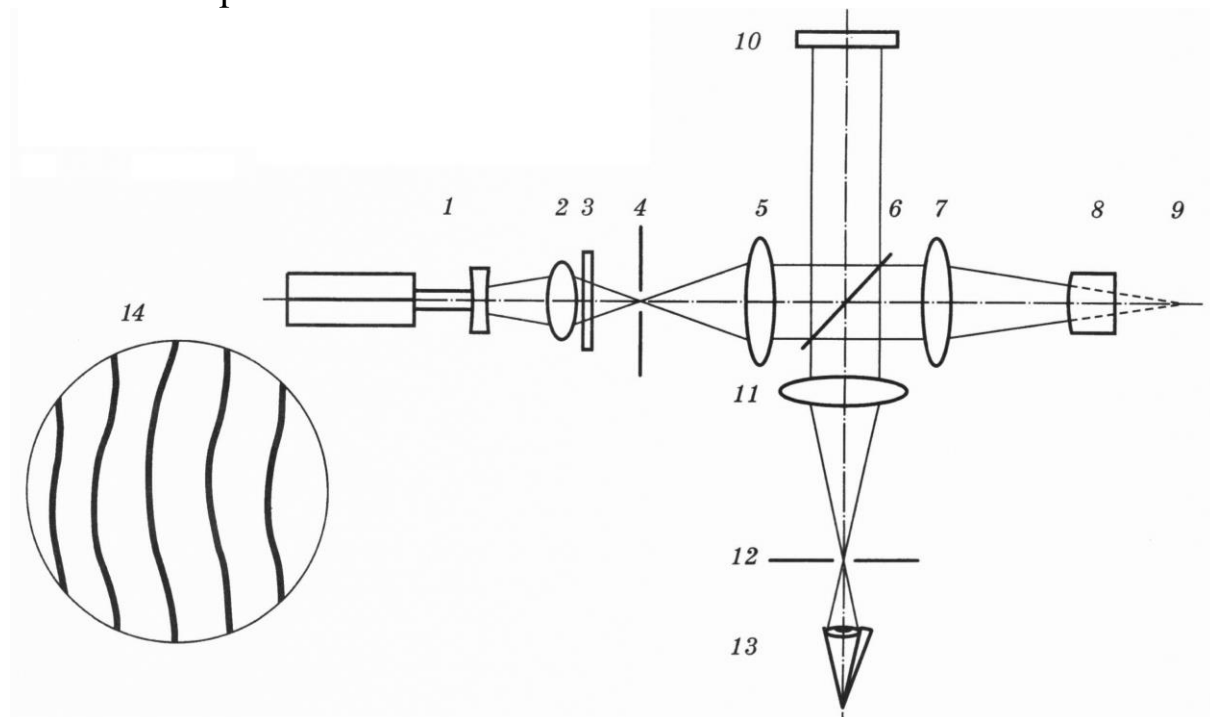


Рис. 6. Интерферометр Тваймана для исследования объектива:
1 – лазер; 2 и 3 – осветительная система; 4 – точечная диафрагма;
5 – коллиматорный объектив; 6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив;
8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического зеркала; 10 – образцовое плоское зеркало;
11 – объектив наблюдательной системы; 12 – наблюдательная диафрагма;
13 – приемник изображения (например – глаз)

На теоретически возможную точность интерферометрического метода часто отрицательно влияет его чувствительность. Точность снижается, например, если среда между контролируемой и эталонной

системами турбулентная и 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 амортизированных устройств.

Такие решения 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.

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 эталонной, детали с образцовой поверхностью, работающей в проходящем свете.

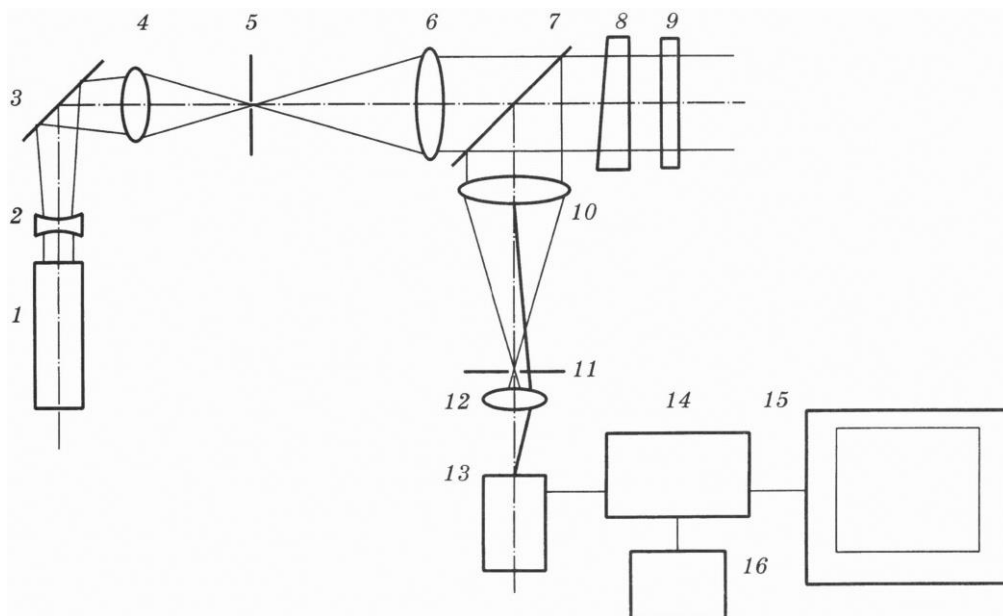


Рис. 7. Схема интерферометра Физо при контроле плоской оптической поверхности:

- 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

На рис. 7 дана схема интерферометра Физо для контроля плоской поверхности. Здесь в качестве образцовой детали 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.

Контроль сферической поверхности

Интерферометр (рис. 8, 9) 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.

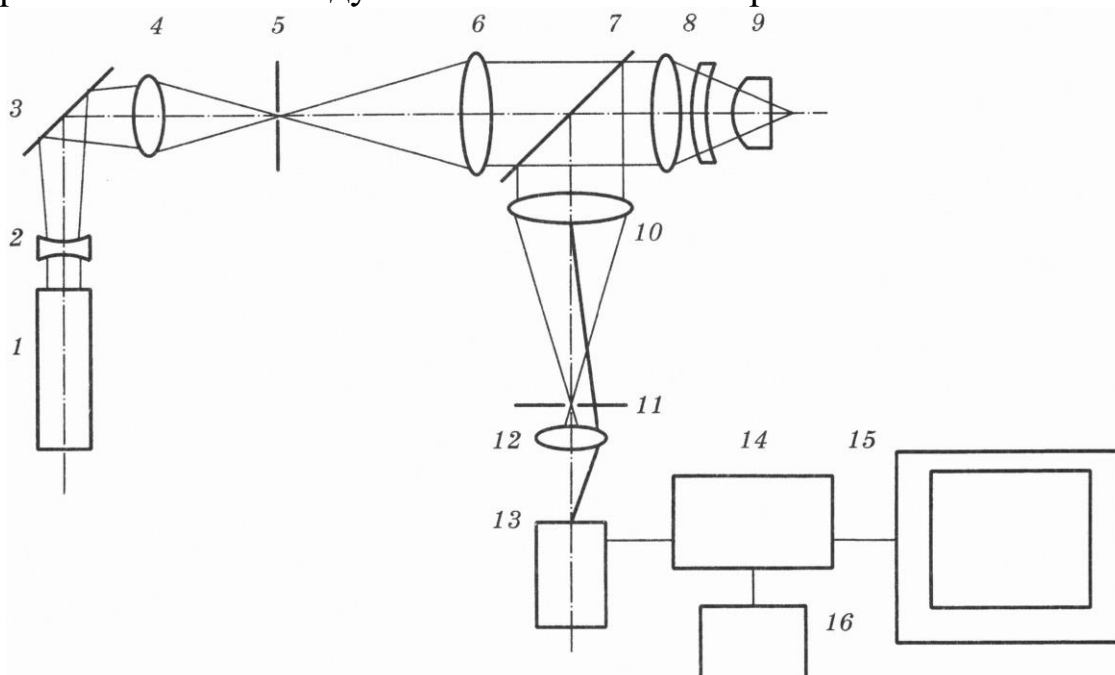


Рис. 8. Схема интерферометра Физо при контроле сферической оптической поверхности: 1 – лазер; 2 – отрицательный компонент осветительной системы; 3 – наклонное зеркало; 4 – объектив осветительной системы; 5 – точечная диафрагма; 6 – коллиматорный объектив; 7 – светоделитель; 8 – объектив интерферометра с образцовой фронтальной поверхностью; 9 – исследуемая деталь; 10 – объектив наблюдательной системы; 11 – наблюдательная диафрагма; 12 – объектив регистратора интерферограммы; 13 – регистрирующая камера; 14 – электронный блок телевизионного анализатора интерферограмм (ТАИ); 15 – телевизионный монитор; 16 – пульт управления ТАИ

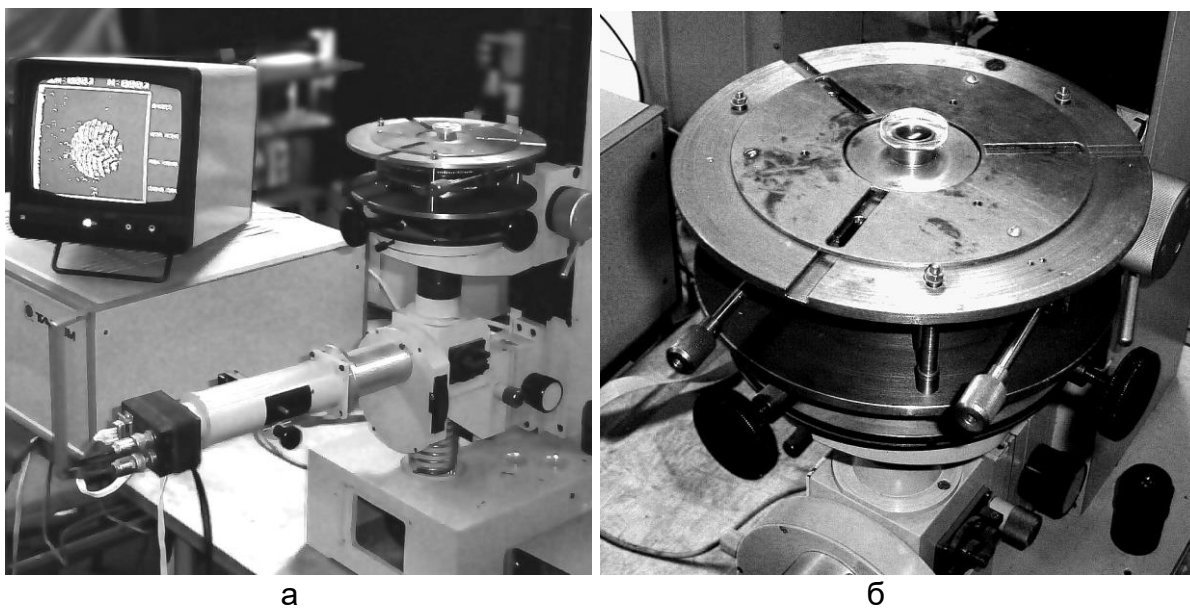


Рис. 9. Общий вид интерферометра с анализатором интерферограмм ТАИ-1 при контроле линзы (а); контроль поверхности линзы на интерферометре Физо (б)

Методика проведения измерений

Рассмотрим пример лабораторной методики проведения измерений.

Задача: получить интерферограммы поочередно от трех 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 определяют величину ошибки исследуемой оптической поверхности (рис. 10) как отношение максимальной стрелки прогиба интерференционной полосы к шагу (периоду) полосы.

$$\Delta N = l/h.$$

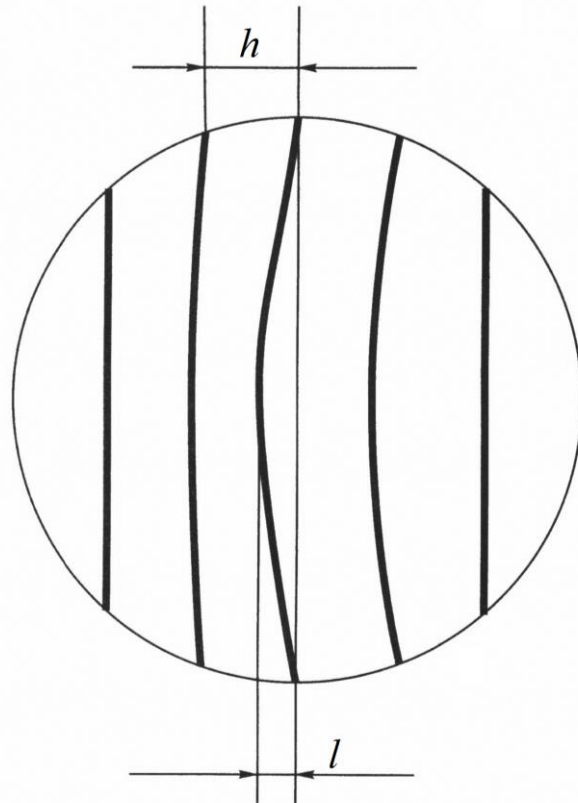


Рис. 10. Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме, исходя из оценки соотношения стрелки прогиба полосы с ее шагом

На рис. 11–14 показаны схема для контроля объектива на интерферометре Физо, общий вид установки и ее элементы.

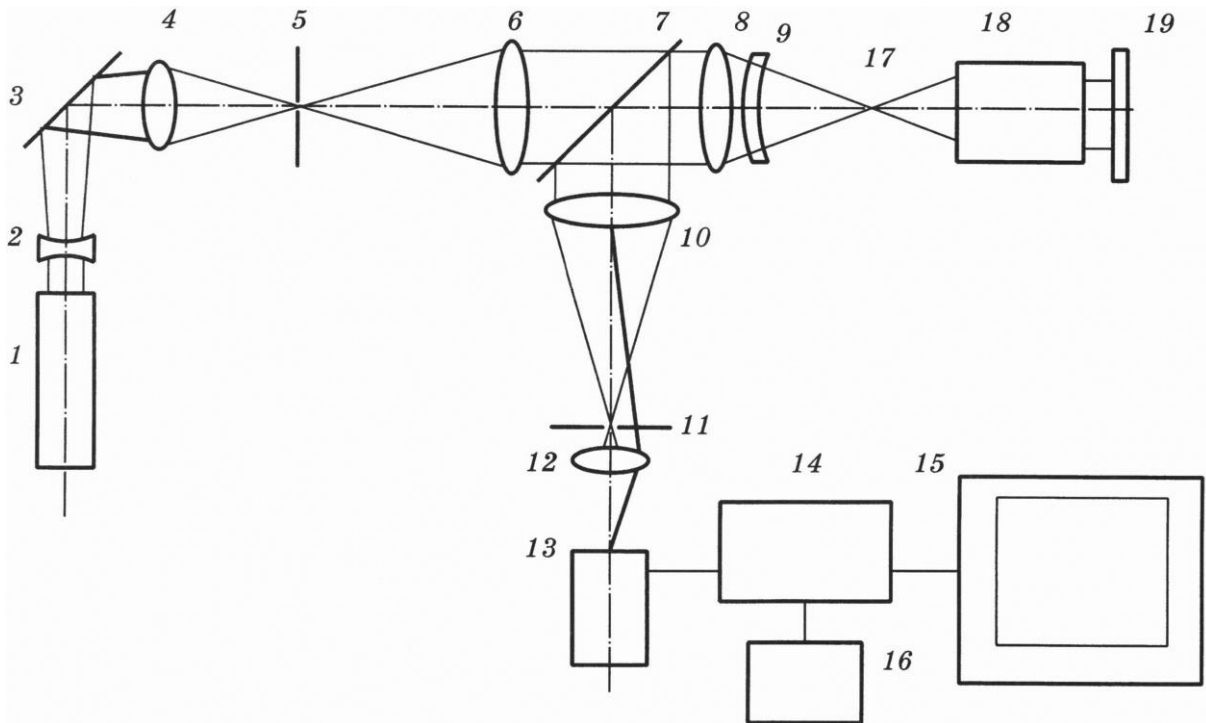


Рис. 11. Схема интерферометра Физо при контроле объектива

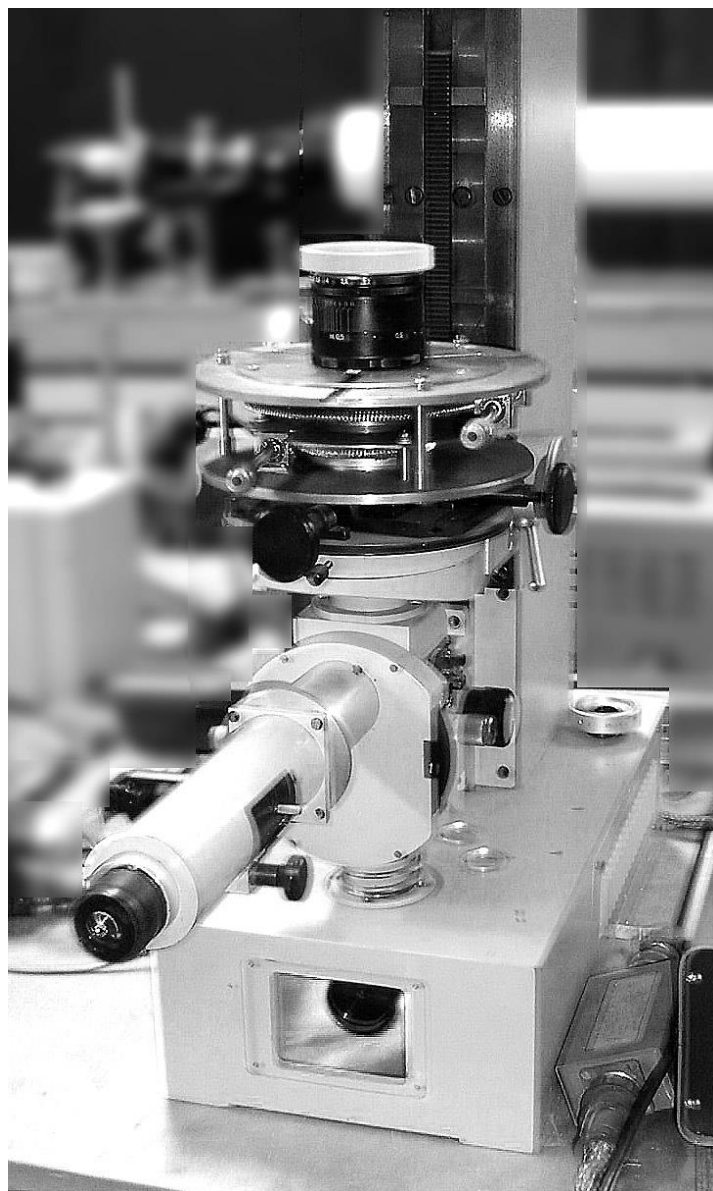


Рис. 12. Общий вид интерферометра Физо при контроле объектива

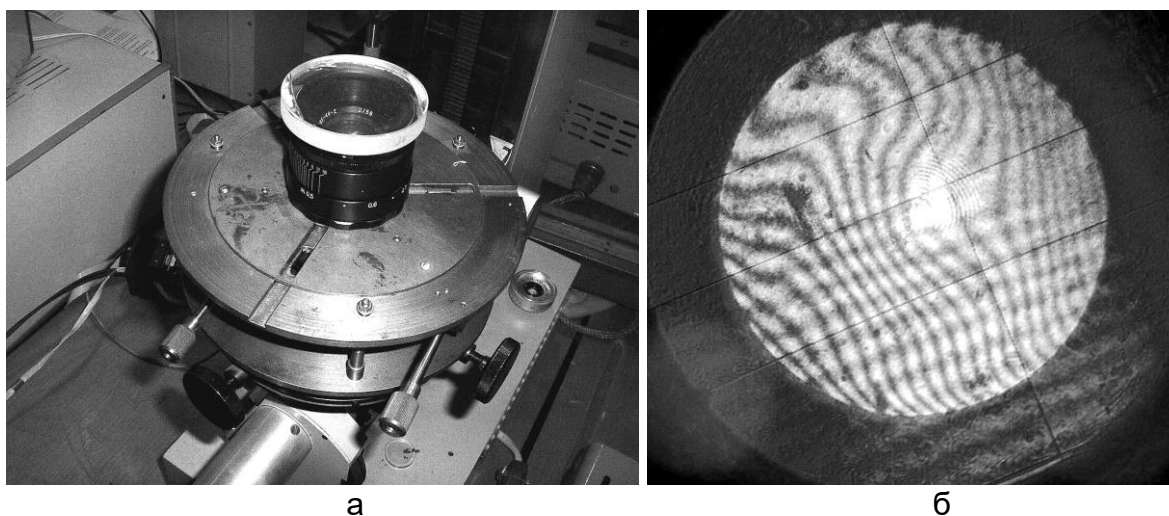
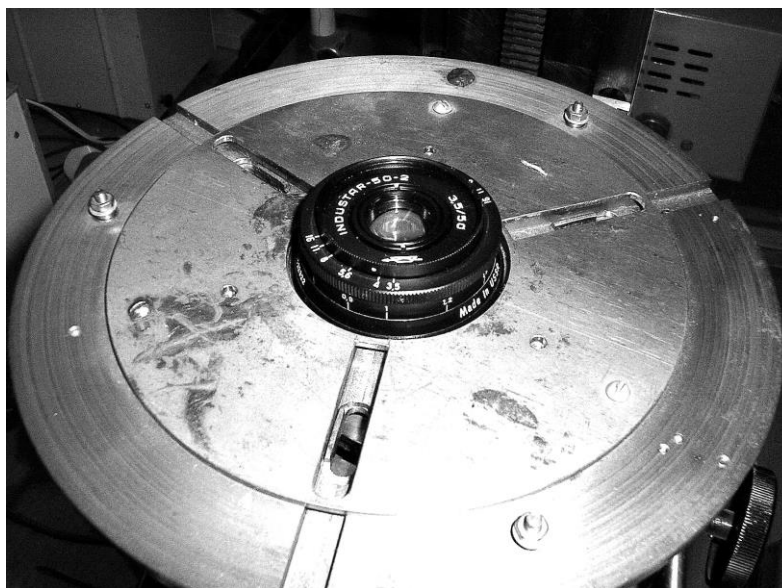


Рис. 13. Контроль объектива Гелиос-44 на интерферометре Физо (а);
интерферограмма объектива Гелиос-44 (б)



а

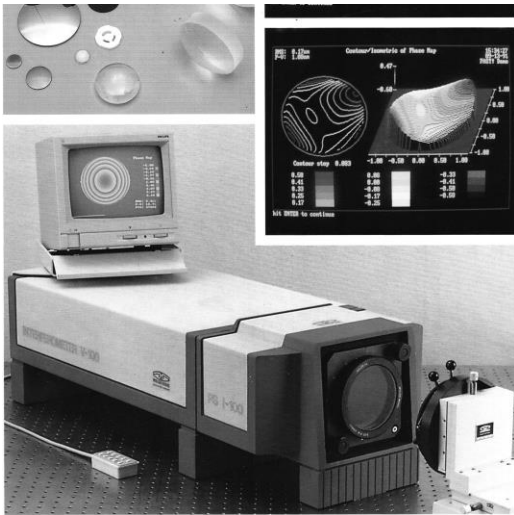


б

Рис. 14. Объектив Индустар-50 на интерферометре Физо (а); интерферограмма объектива Индустар-50 (б)

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

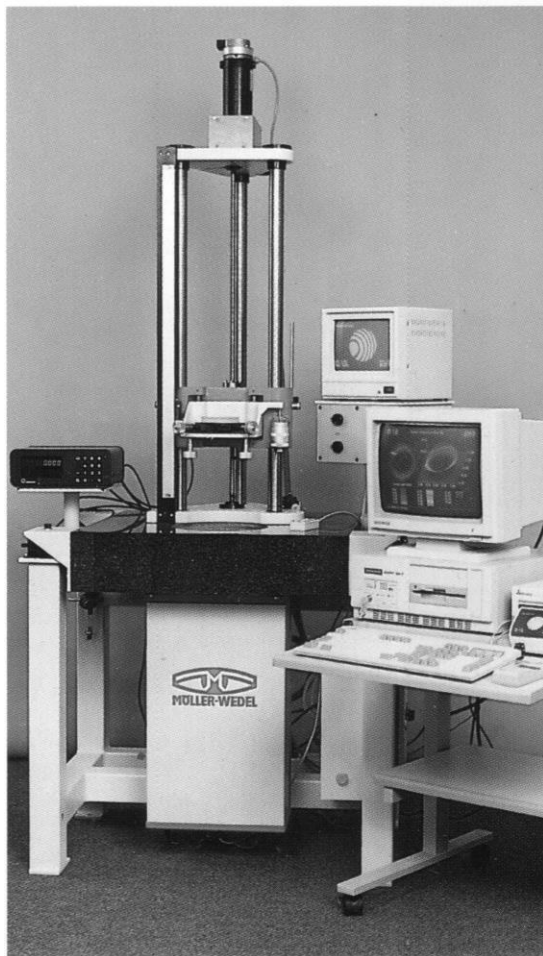
На рис. 15 показаны разновидности конструктивных решений интерферометра Физо для различных целей. Выпускаемые комплексы оснащены компьютерами, видеовыходом и дорогостоящим программным обеспечением. Однако их точностные возможности, как показано далее, ограничены необходимостью применения в их конструкции образцовых деталей, точность которых неизбежно ограничена и находится на уровне $\lambda/20$.



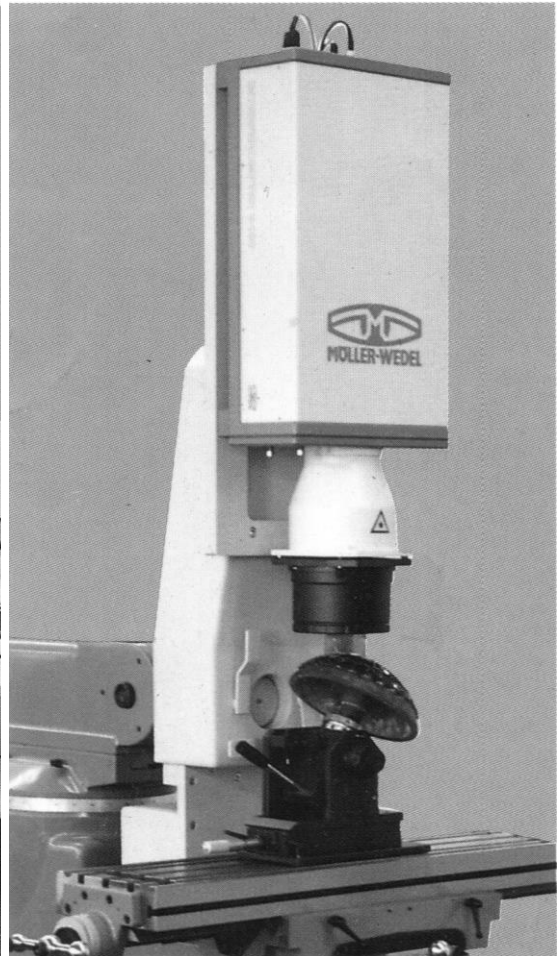
а



б



в



г

Рис. 15. Разновидности конструктивных решений интерферометра Физо (Фирма Möller-Wedel)

ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Рассмотрим 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:

$$\delta = 2h.$$

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

$$I = 2a^2 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \right],$$

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 [3]:

$$I'' = \cos^2\left(\frac{\pi W}{\lambda}\right).$$

Разность хода в волновой мере обозначим как

$$\omega = \frac{\delta}{\lambda}.$$

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

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

При малых углах принимают

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

Тогда

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

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

$$I'' = \cos^2\pi(\nu y + \omega). \quad (1)$$

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

Выражение (1) 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. 16 [2], рис. 17) характеризуются тем, что для формирования опорного волнового фронта в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (обычно – образцовой оптической поверхности, плоской или сферической).

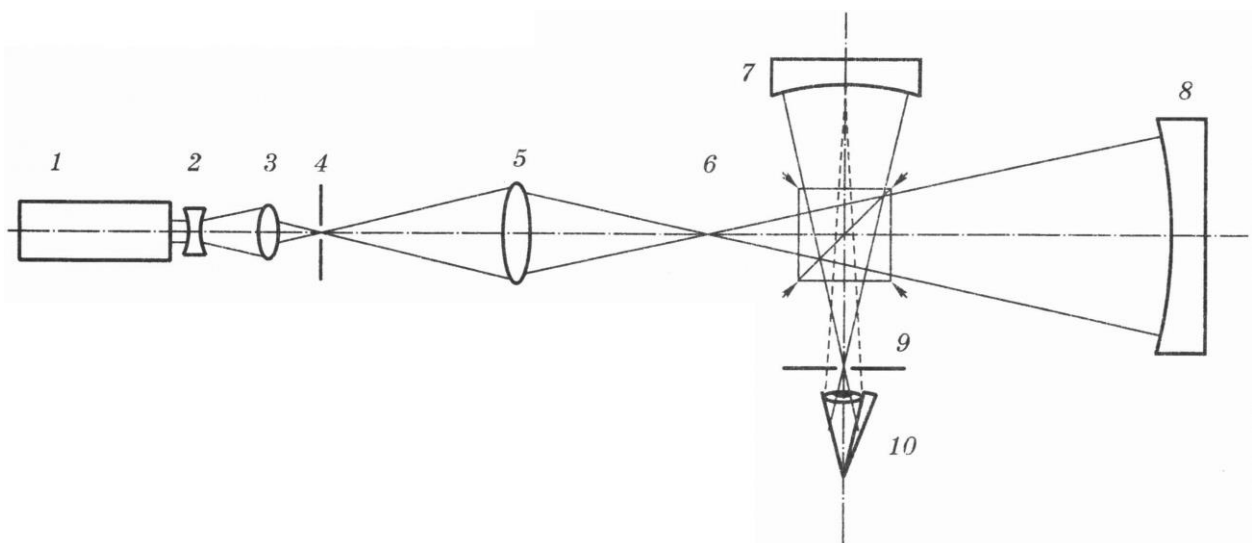


Рис. 16. Лазерный неравноплечий интерферометр со сферической образцовой поверхностью: 1 – лазер; 2, 3 – объектив осветительной системы; 4 – осветительная диафрагма; 5 – микрообъектив осветительной системы; 6 – тест-объект – светящаяся точка; 7 – образцовая сферическая поверхность; 8 – исследуемая сферическая поверхность; 9 – светоделительный кубик; 10 – приемник изображения (например, глаз)



Рис. 17. Лазерный неравноплечий интерферометр – общий вид (а); интерферограмма оптической поверхности (очковая линза) (б)

Такой элемент создает волновой фронт, который содержит остаточные ошибки (деформации). Эти ошибки порождаются следующим рядом причин:

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 воздействия:
 - динамические (например, пережатие в оправе);
 - гравитационные (нарушение разгрузки детали);
 - температурные;
 - вибрационные.

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

$$I'' = \cos^2 \pi(\nu y + \omega + \omega_R),$$

где ω_R – ошибка образцового волнового фронта.

Соответственно точность интерференционного контроля при соблюдении 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 можно определить типовые требования к точности измерения

аббераций и ошибок оптических систем разных классов точности (табл. 1: ω_T – предельно допустимая ошибка образцового волнового фронта прибора для контроля образцовой поверхности интерферометра).

Таблица 1. Требования к точности ω_T для устройства контроля интерферометрических эталонов

Тип оптической системы	Требования к точности системы	Требования к точности прибора контроля	ω_R	ω_T
Зрительная труба	$0,25\lambda$	$(0,025-0,05)\lambda$	$0,032\lambda$	$0,0032-0,0064\lambda$
Исследовательский микроскоп	$0,05\lambda$	$(0,005-0,01)\lambda$	$0,007\lambda$	$0,0007-0,0014\lambda$
Космический телескоп	$0,03\lambda$	$(0,003-0,006)\lambda$	$0,0045\lambda$	$0,00045-0,0009\lambda$

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.

Исследования [1] показали, что выполнение приведенных условий становится возможным в случае создания альтернативного интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом.

В связи с возможной нестабильностью образцового элемента интерферометра (эталона), одноразовую аттестацию к моменту продажи прибора заказчику нельзя считать достаточной. Требуется постоянное обеспечение и поддержание указанной точности в практике измерений (при исследовании оптических элементов и систем наивысшей точности) и оперативный самоконтроль реального состояния опорного волнового фронта в момент каждого сеанса контроля.

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

Одним из наиболее распространенных методов исследования деформаций волнового фронта, в том числе связанных с ошибками формы прецизионных полированных поверхностей и аберрациями 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 $1/100$ – $1/200\lambda$, т.е. 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.

Дифракционный 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 (рис. 18).

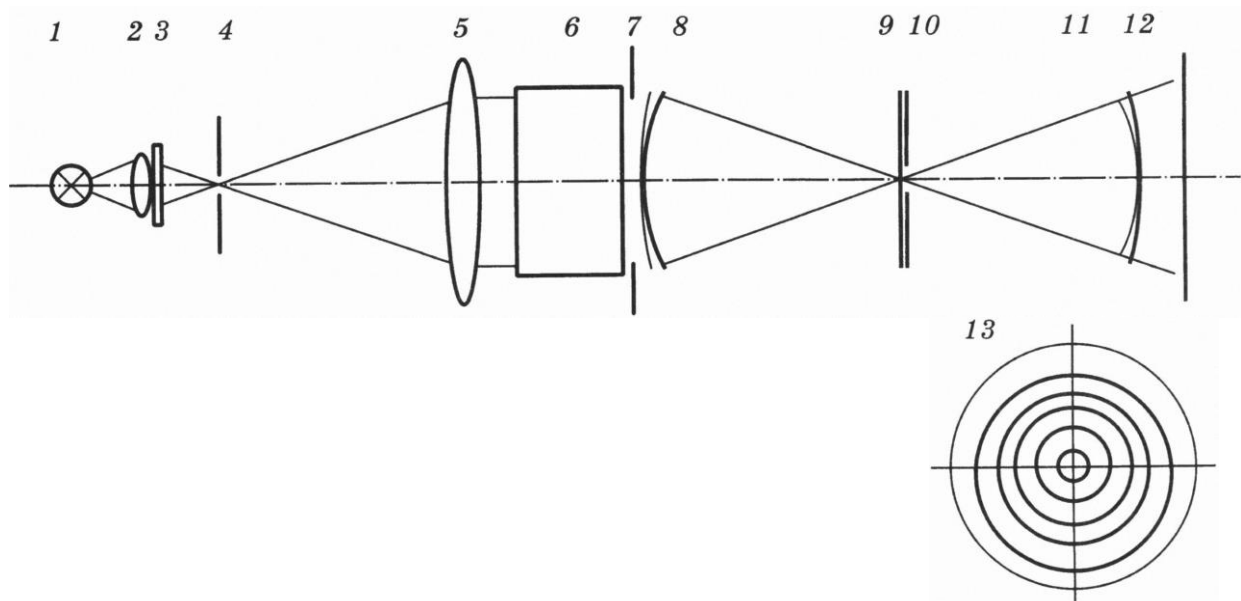


Рис. 18. Схема дифракционного интерферометра Линника: 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – светофильтр; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемая оптическая система; 7 – выходной зрачок; 8 – волновой фронт, сформированный исследуемой системой; 9 – пластинка Линника; 10 – светоделительное покрытие с точечной диафрагмой; 11 – исследуемый искаженный волновой фронт; 12 – дифрагированный сферический опорный фронт

Тест-объект «светящаяся точка» 4, сформированный элементами 1–4 в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5, 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 aberrациями 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 изменения 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 интерференционной картины.

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. Данная схема обеспечивает получение интерферометра с совмещенными ветвями, не чувствительного к вибрации.

Недостатки схемы Линника, на наш взгляд, следующие:

- наилучшая освещенность интерференционной картины достигается при кольцеобразной форме полос, визуальная расшифровка которых затруднена, а компьютерная – требует создания специального (дорогостоящего) программного обеспечения;
- поперечная расфокусировка интерферометра для получения прямых интерференционных полос ограничена диаметром пятна рассеяния. Получаемые интерференционные картины имеют невысокое качество и зашумлены, что снижает точность измерений.

Кроме того, настройка интерферометра Линника при исследовании фокусирующего оптического элемента требует использования микроподвижек с чувствительностью менее 1 мкм, что усложняет и удорожает практическую реализацию интерферометра.

Неравноплечий дифракционный интерферометр

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал неравноплечий лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и разнесенными ветвями [3] (рис. 19).

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.

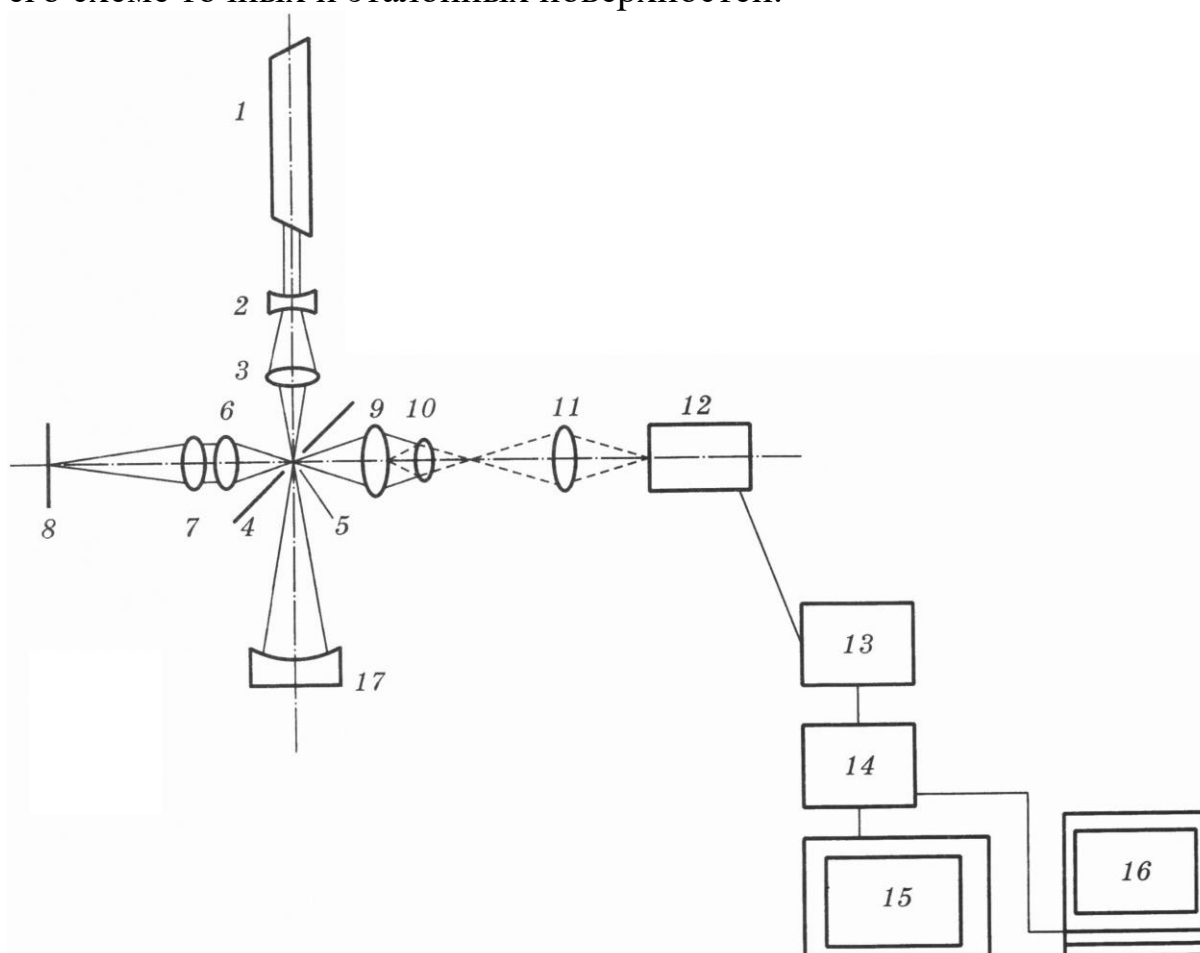


Рис. 19. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом: 1 – лазер; 2–3 – осветительная система; 4 – наклонное зеркало; 5 – точечная диафрагма; 6, 7 – встречные коллиматорные объективы; 8 – плоское автоколлимационное зеркало; 9–11 – наблюдательный микроскоп с линзой Бертрана; 12 – видеокамера; 13 – блок обработки изображения; 14 – блок выделения центров интерференционных полос; 15 – телевизионный монитор; 16 – компьютер; 17 – измеряемая поверхность

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. 19).

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

На одну из поверхностей светоделителя, 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.

Точечное отверстие служит источником сферической 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 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. 19. 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 6–8.

В плече наблюдения имеются объектив 9 и окуляр 11 для наблюдения освещенной точечной диафрагмы 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 дифракционного кружка, перекрывающего точечное отверстие (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 автоколлимационного осветительного плеча, содержащего 6, 7 – встречные коллиматорные объективы и плоское зеркало 8, формирующее автоколлимационный точечный источник, который элементами 6, 7 фокусируется на отверстии 5 в направлении плеча наблюдения 9–11.

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 интерференция 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 безэталонным, 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.

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 $0,001\lambda$.

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.

ВЛИЯНИЕ 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° 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, 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.

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. 20, 21 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. 21, а, направлен вертикально.

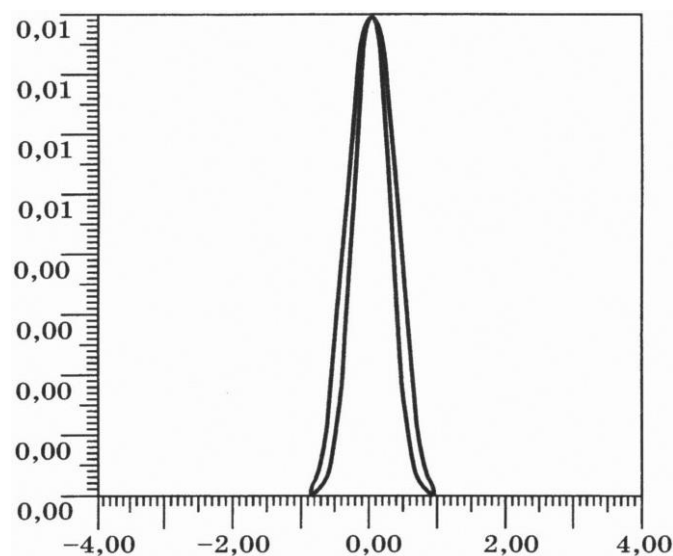


Рис. 20. Дальнепольное распределение интенсивности света, дифрагированного на отверстии диаметром 140 нм

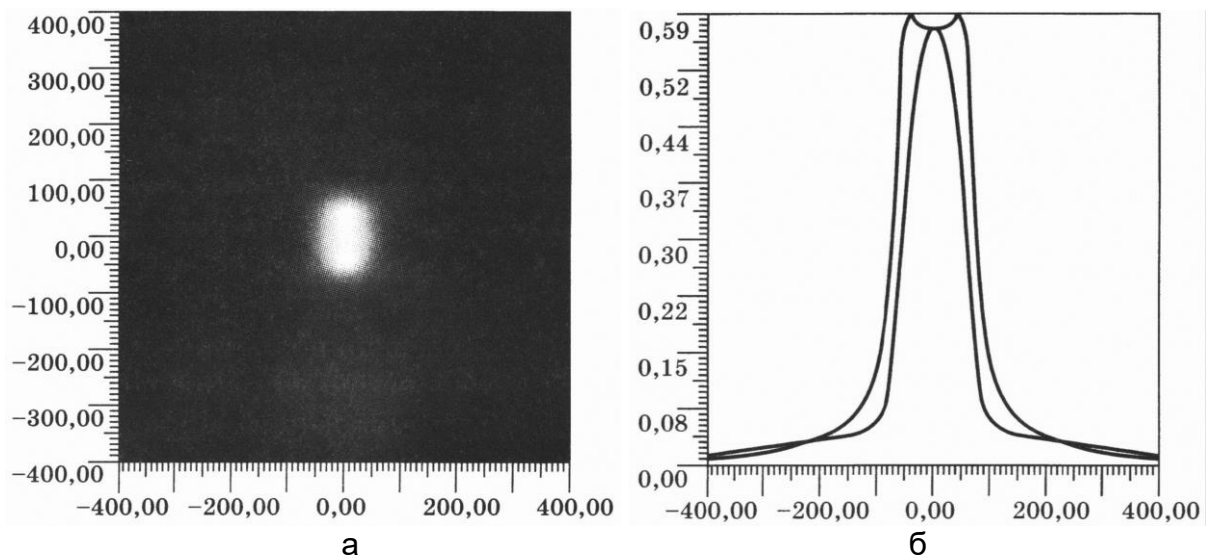


Рис. 21. Распределение интенсивности в ближнем поле: полутоновая картина (а); поперечное сечение в двух взаимно перпендикулярных направлениях (б)

Как следует из рис. 21, 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 гауссовской 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 (рис. 22).

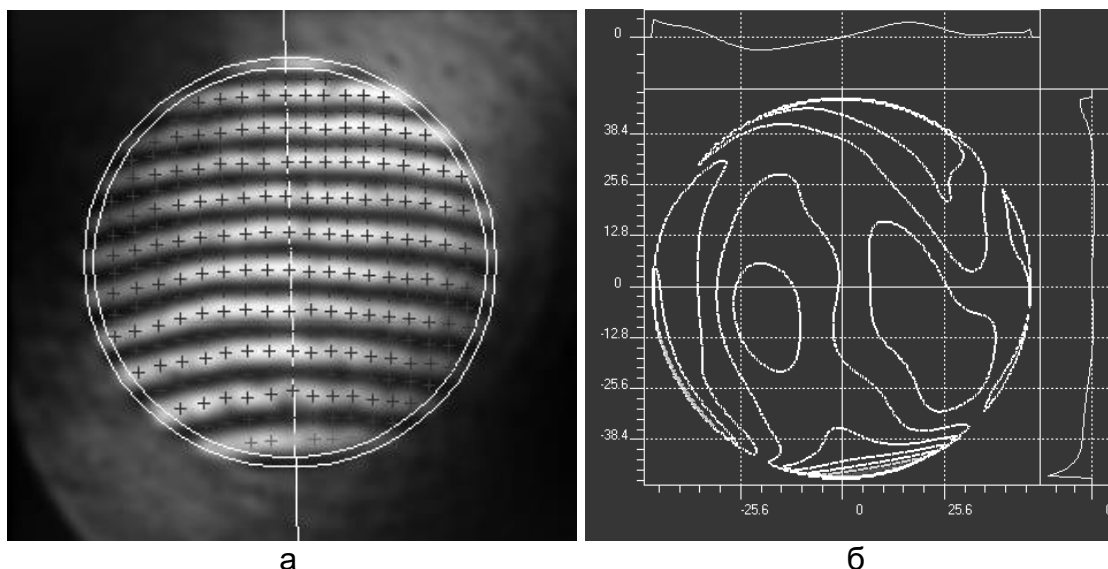


Рис. 22. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б)

В отличие от неравномерности амплитуды, которая является следствием неравномерности индикатриссы излучения вторичного источника, формирующегося в области отверстия [1], 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 [1] на основании выводов работ и справедливой на таких

расстояниях от экрана, которые не менее чем на три порядка превышают размер отверстия:

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

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) $0,00013(\lambda)$, а среднеквадратическая погрешность (RMS), соответственно, равно $0,00004(\lambda)$. Соотношение (2) 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:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d},$$

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 $\pm 18^\circ$, 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° , 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 [1], что эквивалентно преобразованию Фурье в угловых пространственных частотах.

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 (рис. 22, 23), ни от изменения угла наклона плоскости диафрагмы, ни от положения детали в пределах 80%-ого угла от нулевого порядка дифракции.

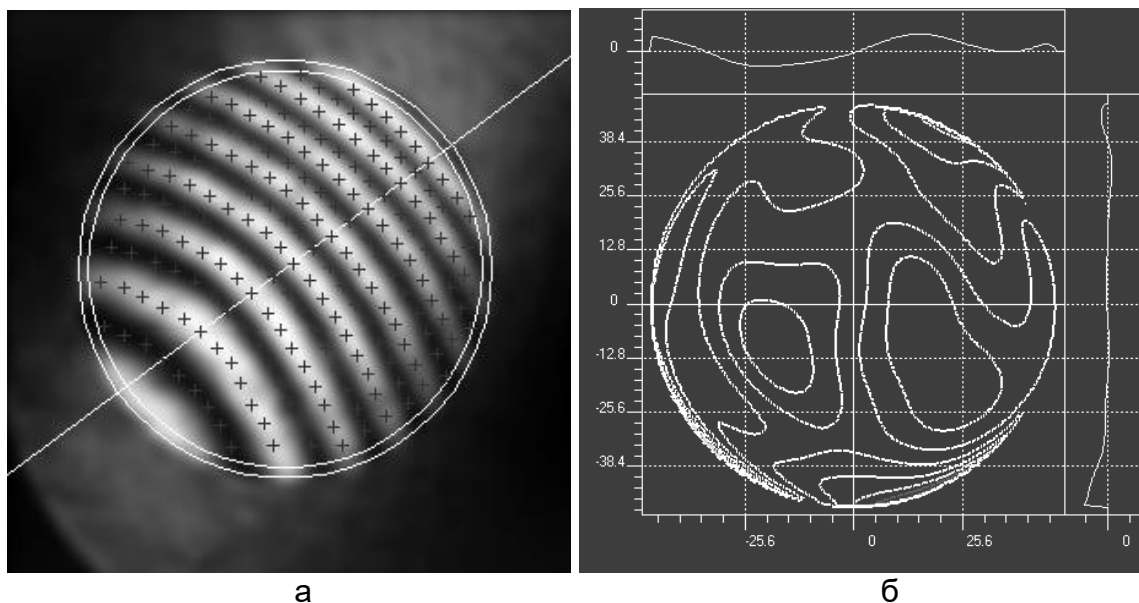


Рис. 23. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б) при изменении угла наклона плоскости диафрагмы

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 аберрации $\delta l'$ (связанной с деформацией исследуемого волнового фронта) с коэффициентом пропорциональности k :

$$E_T = k\delta l'.$$

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):

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

где $\tilde{I} = I_i / I_0$, где I_i – значение интенсивности в данной точке интерференционного изображения; I_0 – интенсивность в той же точке при отсутствии аберрации; $\omega = W/\lambda$; 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 (рис. 24). 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, т.е. меньше цены шага интерференционной полосы (т.е. $\lambda/2$ или λ). В работе [3] дан анализ возможностей и ограничений методов и средств исследования прецизионных поверхностей. Недостатки плавных характеристик 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.

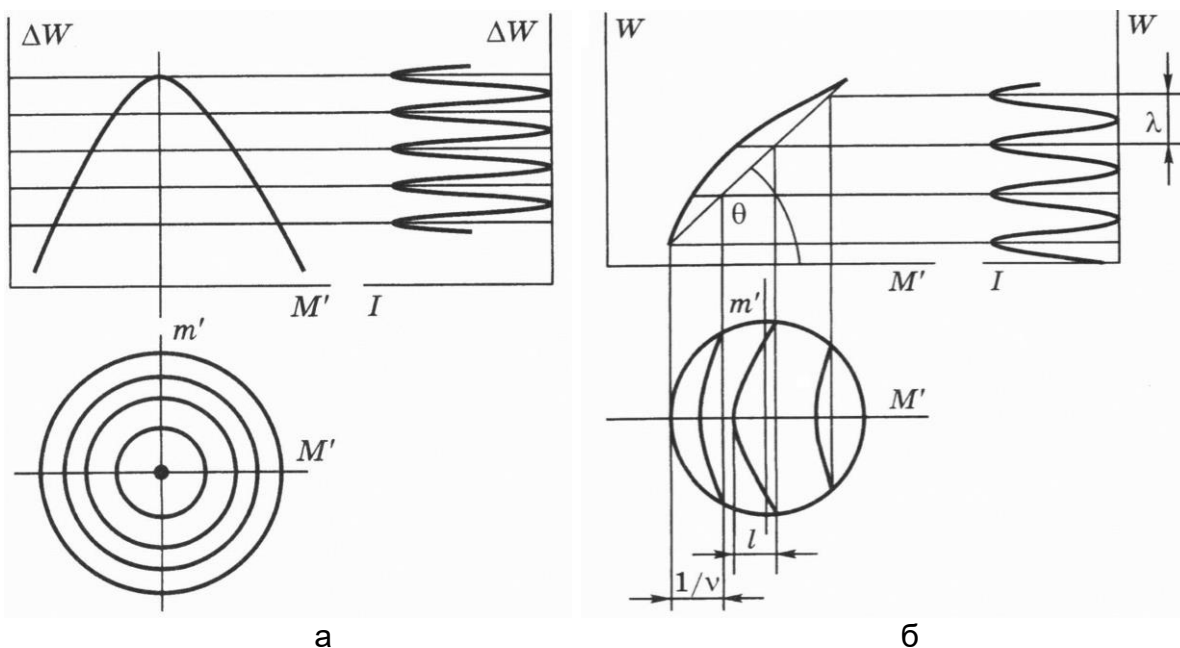


Рис. 24. Схема функционирования периодической функции преобразования: точно сфокусированный интерферометр (а); поперечно расфокусированный интерферометр (б)

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»:

$$I = 1 + \cos\left(\frac{2\pi W}{\lambda_w}\right);$$

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

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

или $I(W) = I_{\max}$ при $W=0$,

$I(W)=0$ при $W \neq 0$;

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

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

где $\lambda_w \leq W \leq n\lambda_w$, или, на практике:

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

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

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. 5) с умножением частоты полос осуществлена согласно ФП вида:

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

где $I_{ок}$ – относительная интенсивность в оконтуренной интерферограмме; θ – угол заклона 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.

Анализ погрешностей метода интерферометрии

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.

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 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 $0,01\lambda$.

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, который можно описать функцией $I_{\text{инт}}$. Для анализа причин и разработки путей устранения этого недостатка традиционных методик, мы рассматриваем здесь источники указанной нерезкости.

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

$$I_{\Sigma 1} = I_{\text{инт}} \otimes I_{\text{ФРТ П}}$$

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

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

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. 25).



Рис. 25. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос

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 РДИ-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.

На рис. 26 показано полученное таким способом изображение интерферограммы. Как видно из рисунка, плавная пограничная зона преобразована в четкую штриховую линию.

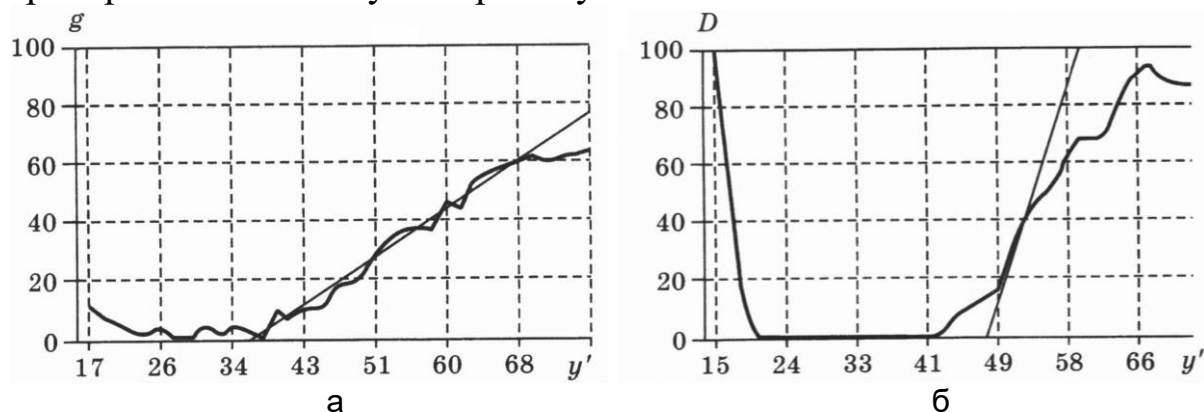


Рис. 26. Оконтуривание края интерференционной полосы (а) с выделением изофоты; при этом в полученном изображении резко возрастают пограничные градиенты (б)

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 (рис. 27) 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 оконтурированной границы.

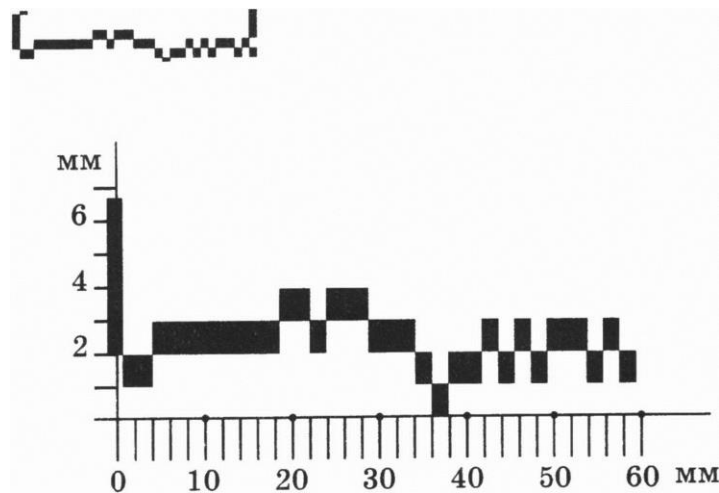


Рис. 27. Влияние шума вдоль штриховой границы полосы

Статистическая обработка дала следующие результаты:

$$\sigma_z' = \pm 0,087 \text{ мм},$$

где σ_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. 28) возрастает не менее чем в 4 раза.

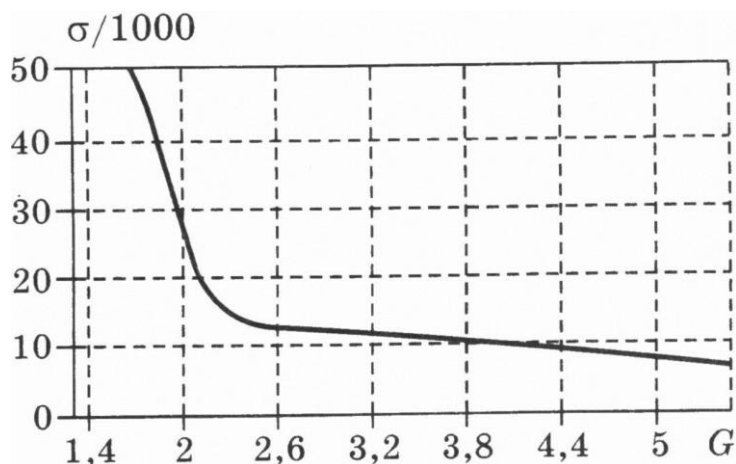


Рис. 28. Экспериментальная зависимость среднеквадратической погрешности наведения на границу интерферограммы от уровня градиента

Достигнутый результат, на наш взгляд, является достаточно убедительным, так как 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 [1, 2], где в качестве референтного (эталонного) волнового фронта используется волна, дифрагированная на отверстии с диаметром, сравнимым с размерами максимума первого порядка (диском Эри) дифракционного кружка. Схема подобного интерферометра показана на рис. 19, общий вид разработанного и собранного образца – на рис. 29. С целью восстановления фазы волнового фронта и топографии поверхности используется коммерческая программа обработки интерферограмм MathOPTIX Zebra [3], разработанная на кафедре прикладной и компьютерной оптики (ПиКО) Университета ИТМО, а также программное обеспечение обработки интерферограмм, созданное на кафедре компьютерных технологий.

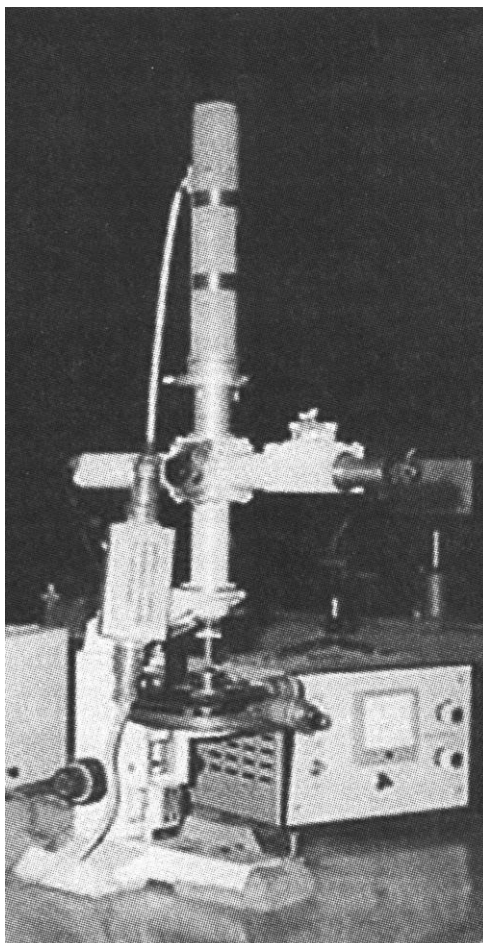


Рис. 29. Дифракционный интерферометр для исследования объективов микроскопов

Программа MathOPTIX Zebra 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 MathOPTIX Zebra, аналогична программному обеспечению интерферометров таких ведущих фирм, как Zygo, Veeco и Möller-Wedel. Авторами-разработчиками программы MathOPTIX Zebra являются сотрудники кафедры ПиКО В.М. Домненко и Д.А. Гаврилин.

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 RMS в микрометрах или количестве рабочих длин волн.

Использование этой программы для обработки интерферограмм, полученных в интерферометре с дифракционной волной сравнения (PDI-интерферометре) (рис. 30), 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 $1/20\lambda$, причем нет гарантии от неконтролируемого изменения этой величины в процессе эксплуатации интерферометра.

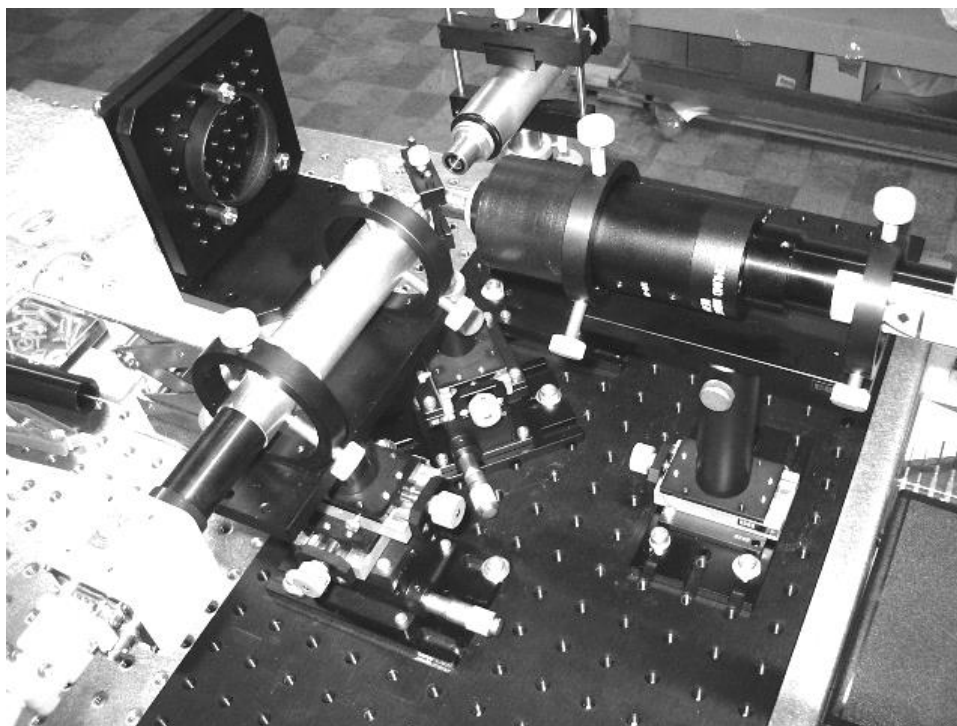


Рис. 30. Общий вид экспериментального PDI-интерферометра, построенного на базе серийных узлов производства фирм Möller-Wedel и ЛОМО

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 рис. 31, относятся к двум различным уровням качества исследуемых поверхностей линз.

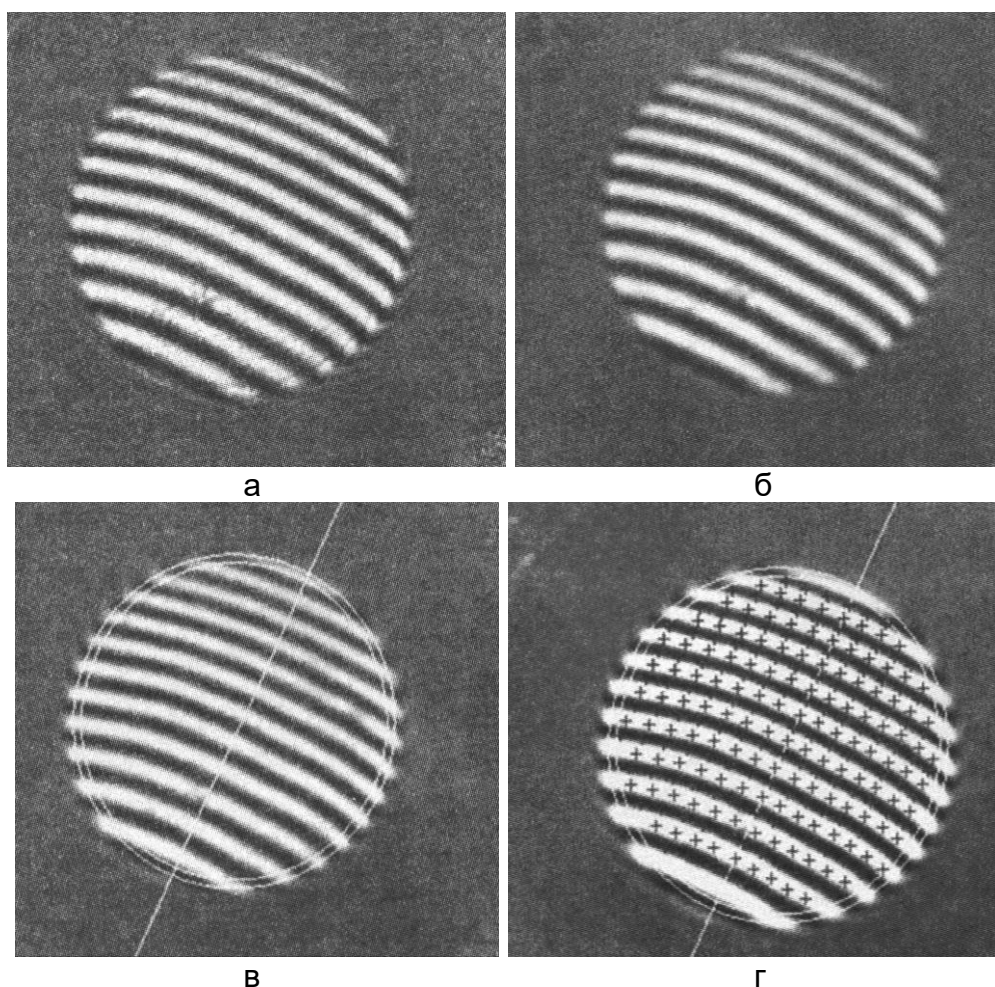


Рис. 31. Высокая надежность распознавания полос на интерферограммах обычной конфигурации

Первый – это случай контроля поверхности с достаточно малым отклонением от сферичности, т.е. 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 MathOPTIX Zebra происходит четко 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 – 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 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 полос.

В практике таких измерений требуется применение более высокоразрешающей ПЗС-матрицы, например, измерительной матрицы с количеством пикселей значительно больше 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.

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕРА С ДИФРАГИРОВАННЫМ ОПОРНЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

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 № 655188, 1978). Активная работа по исследованию и развитию данного уникального технического решения продолжалась все прошедшие годы с привлечением различных творческих коллективов.

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 и заимствуют созданные нами решения. Причиной такого повышения научно-технической активности 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.

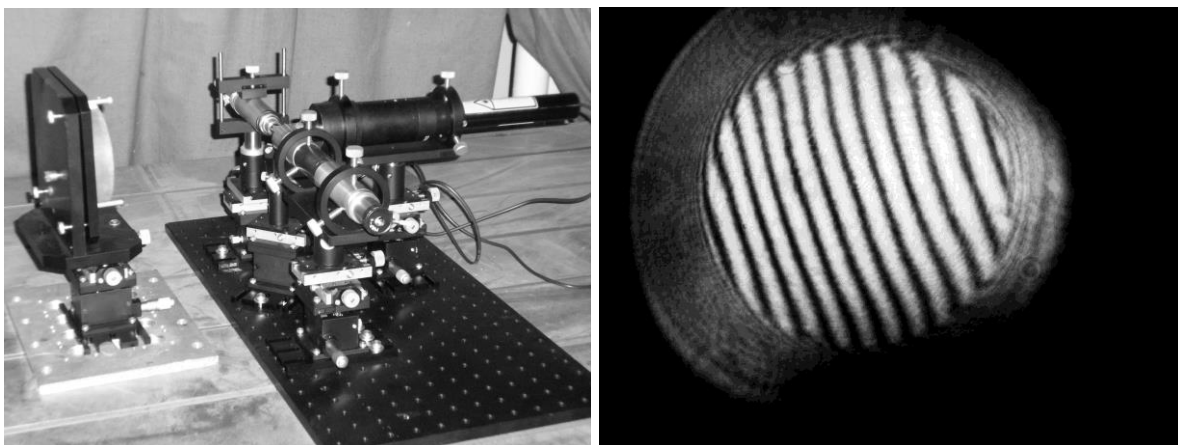


Рис. 32. Установка исследования прецизионного сферического зеркала на основе дифракционного интерферометра на виброизолирующем интерференционном столе

На рис. 30 и рис. 32–34 представлен образец интерферометра, созданный для решения задач современной нанолитографии В.К. Кирилловским и Н.Б. Вознесенским на базе узлов, серийно

выпускаемых фирмами Melles-Griot и ОАО «ЛОМО» и результаты исследований.

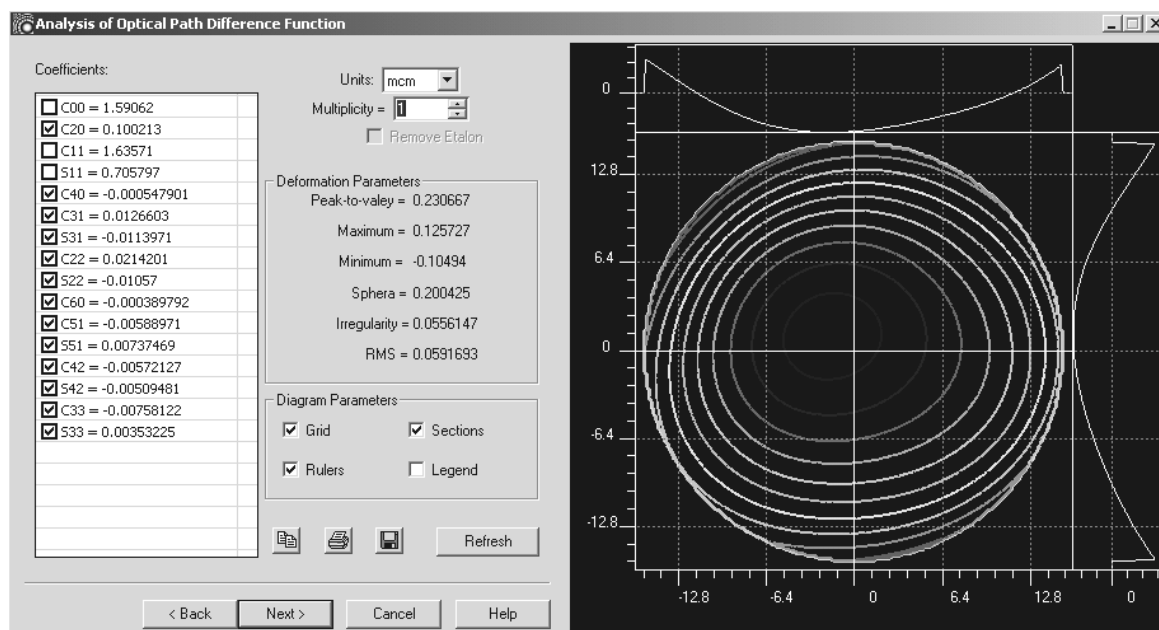


Рис. 33. Карта и профили деформаций волнового фронта по данным традиционной интерферометрии

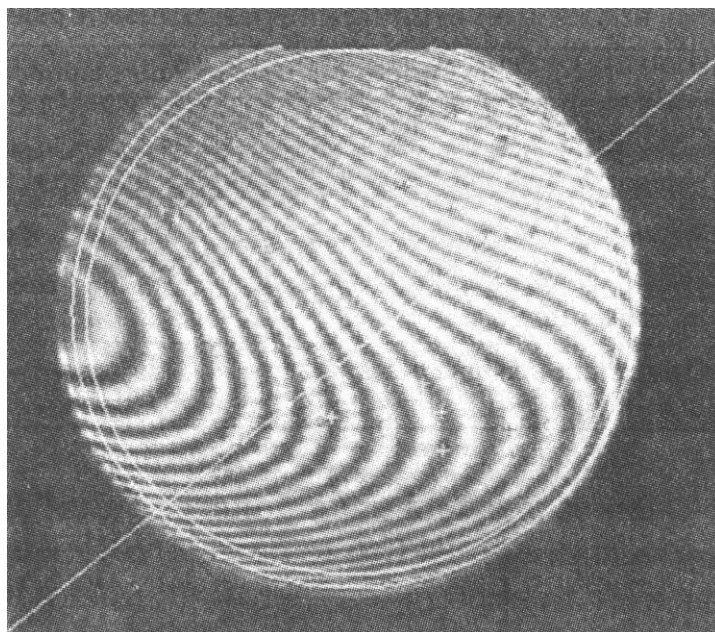
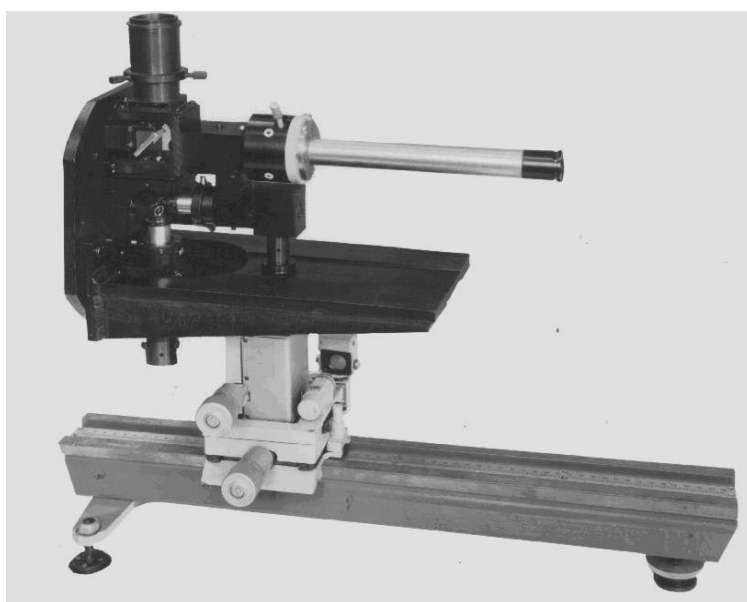


Рис. 34. Сложная интерферограмма как модель для отладки нового поколения программного обеспечения расшифровки

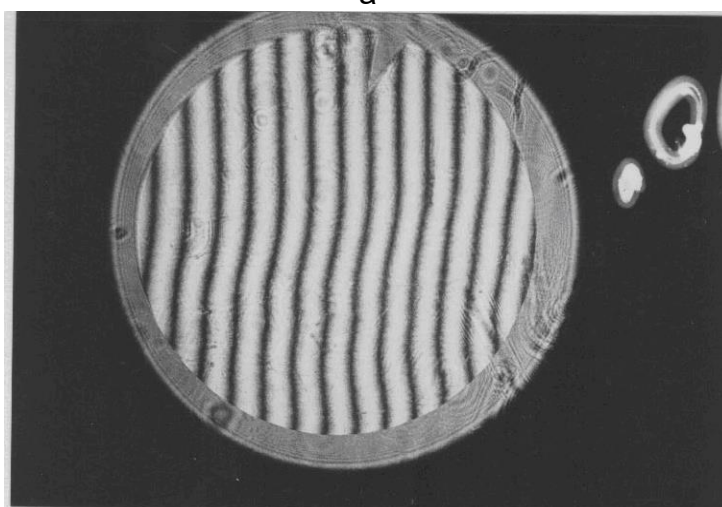
Показаны образцы различных конструктивных решений дифракционного интерферометра, созданные в разные годы и для различных целей. В их числе – интерферометр для исследования прецизионной оптики микроскопов, применение которого обеспечило создание нового комплекта объективов для современных микроскопов (выпускаемых ныне в России и в Китае). На макете

рассмотренного интерферометра проводились исследования опытных образцов микрообъективов ОА-6,3Л, ОПХ-10Л, ОПХ-25Л, ОПХ-40Л, ОПХ-100Л и ОА-63ЛБ, которыми комплектуются опытные образцы люминесцентных микроскопов ЛЮМАМ. Эта работа продемонстрировала широкие возможности прибора, в частности его способность контролировать микрообъективы с большим диапазоном увеличений при минимальном времени перенастройки.

Более совершенная конструкция (рис. 35) разработана по техническому заданию В.К. Кирилловского талантливым инженером В.А. Удаловым для технологического контроля и аттестации прецизионных оптических систем космических телескопов в условиях производства.



а



б

Рис. 35. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом (а); интерферограмма (б)

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 (табл. 2), инструкция по эксплуатации, а также результаты исследований первого образца данного прибора (рис. 32–34).

Таблица 2. Технические данные интерферометра ПК-881 (ЛОМО)

Предельная инструментальная погрешность	$\lambda/100$
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 трем осям, мм	± 10
Приемник изображения	Фотокамера цифровая
Источник света	Лазер гелий-неоновый
Длина волны излучения, мкм	0,6328

Назначение

Интерферометр предназначен для контроля и аттестации формы вогнутых поверхностей оптических деталей и аберрации оптических систем в автоколлимации от плоских зеркал, а также погрешностей формы оптических поверхностей контрольных зеркал. Прибор предназначен для работы в термостатированном помещении при температуре окружающей среды $+20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ 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. 36.

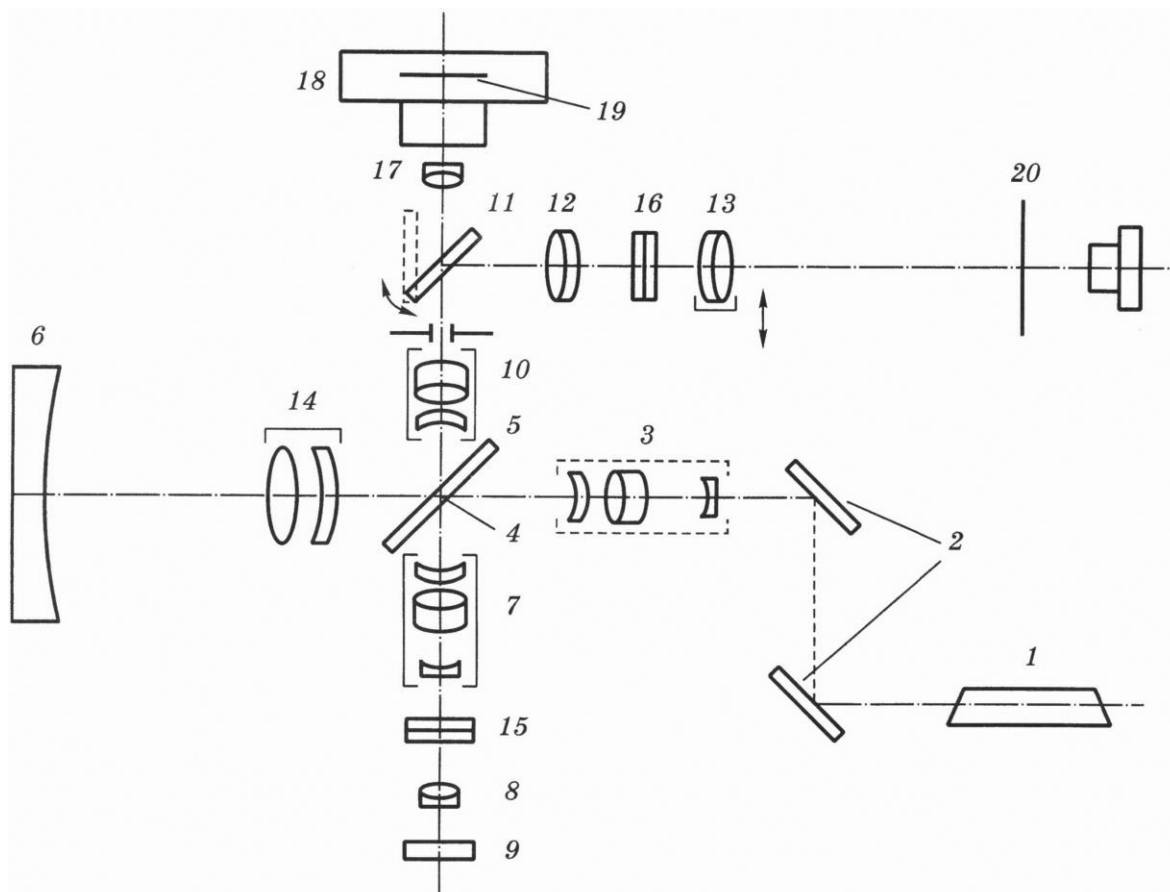


Рис. 36. Схема безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом ПК-881

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 и 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 (матричный или фотографический) 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 дифрагированная 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 цифровая фотокамера без объектива. Интерференционная картина формируется в плоскости матрицы.

Конструктивное решение безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом ПК-881 представлено на рис. 37.

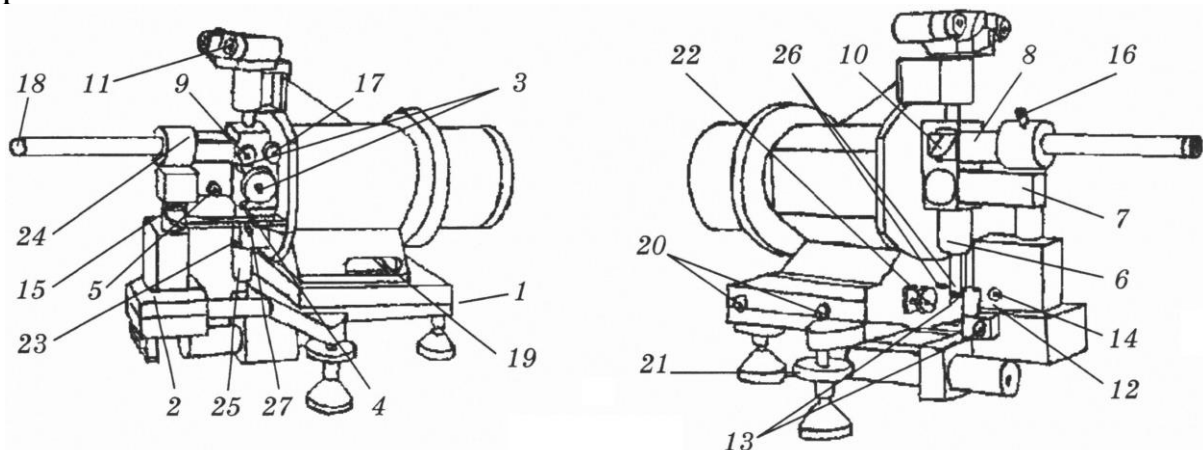


Рис. 37. Конструктивное решение безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом ПК-881

Основание 1 интерферометра имеет три ножки с регулировкой по высоте. На направляющую основания устанавливается с возможностью продольного перемещения подвижная каретка 2 со стойкой трубчатой конструкцией. На стойке смонтирована система из двух неподвижных и одного подвижного зеркал, 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 с точкой с помощью винта 4.

Механическая конструкция интерферометра обеспечивает максимальную жесткость для предотвращения влияния вибраций.

Объектив осветительной системы (рис. 37) обеспечивает фокусировку лазерного излучения рукояткой 5 на осевую точку зеркала с апертурой 0,2. Автоколлимационный осветитель 6 отъюстирован соосно с осветительной системой 7.

В зависимости от того, какая контролируется поверхность (алюминированная, без покрытий или просветленная) производится замена узла автоколлимационного осветительного зеркала 25 на узел с автоколлимационной пластинкой, имеющей плоскую поверхность с соответствующим коэффициентом отражения. Наблюдательная система 8 отъюстирована соосно с автоколлимационной осветительной системой. Объектив наблюдательной системы имеет фокусирующую подвижку 9 вдоль оси 3 мм, максимальную апертуру 0,3 и ирисовую диафрагму. Зеркало 10 выполнено выключаемым. 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. 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 аберрационных характеристик исследуемой оптической системы, а также получения 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 метрологической аттестации интерферометра ПК-881

Аттестация прибора включает две операции.

1. Аттестация точечной диафрагмы разделительного зеркала: с исследованием размера и формы пучка излучения, спроецированного на матовый экран.

– 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;

– измерить радиус R темного кольца на фотоснимке, а также от точки препарата до плоскости установки матрицы. Найти апертурный угол (рад) расходящегося пучка за точечной диафрагмой из выражения

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{R}{L},$$

где L – расстояние от точки препарата до плоскости установки пленки;

– найти апертурный угол σ' (рад) объектива 3 осветительной системы из выражения: $u' = \sin \sigma'$, где u' – расчетная апертура объектива;

– найти диаметр точечной диафрагмы по формуле:

$$d_T = \frac{1,22\lambda}{\nu - \delta};$$

– точечная диафрагма считается удовлетворительной, если соблюдается условие

$$d_T \leq 0,5d_{oc},$$

где d_{oc} – диаметр пятна рассеяния осветительного объектива.

Допускается определение размера точечной диафрагмы измерением с помощью микроскопа.

2. Аттестация интерферометра путем регистрации интерферограмм пробного стекла.

Операция осуществляется путем фотографирования ряда интерферограмм вогнутого, имеющего местную ошибку пробного стекла, при его поворотах относительно оптической оси интерферометра через $22,5^\circ$ (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 интерферограмм. 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-881 осуществляется контролем того же пробного стекла на неравноплечем интерферометре и сравнением результатов. Сферические аберрации эталонного зеркала считаются малыми.

Ожидаемая погрешность интерферометра не превышает $0,01\lambda$, 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 изображений с использованием последних достижений в области цифровой и вычислительной техники.

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 Университете ИТМО на кафедре ПиКО 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 aberrаций, 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 матричного устройства ввода изображений. Конвертирование интерференционных картин из наиболее распространенных графических форматов файлов (BMP, TIFF, GIF и JPEG).
- Сохранение интерферограммы, а также результатов их обработки в файл.
- Выполнение предварительной обработки интерферограмм с целью улучшения их качества (учет неравномерности освещенности интерферограммы, устранение шумов).
- Выбор из серии зарегистрированных интерферограмм лучшей по фотографическому качеству.
- 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 (рис. 38) является первым этапом обработки интерференционной картины. Фильтрация интерферограммы приводит к устранению шумов, что способствует более стабильной работе алгоритмов расшифровки.

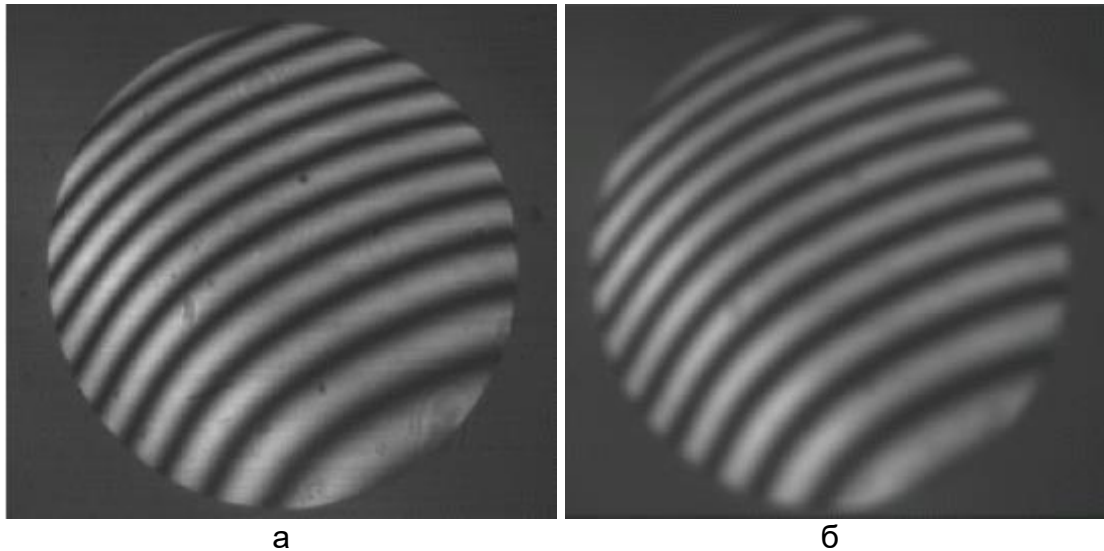


Рис. 38. Фильтрация шумов интерферограммы в программе Zebra Master: до фильтрации (а); после фильтрации (б)

3. Вторым этапом обработки интерференционной картины является определение контура интерферограммы (рис. 39, а).

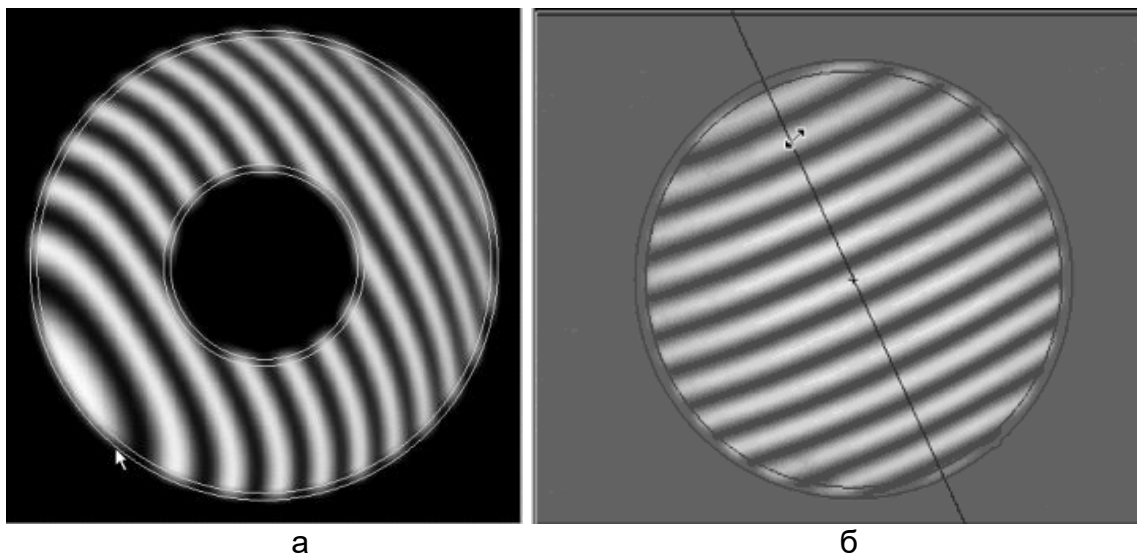


Рис. 39. Автоматическое определение: контура интерферограммы программой Zebra Master (а) и линии первоначального сканирования (б)

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 (рис. 39, б). При переходе к этому этапу программа определяет линию сканирования автоматически.
5. Основной этап обработки – расстановка точек на интерференционных полосах (рис. 40).

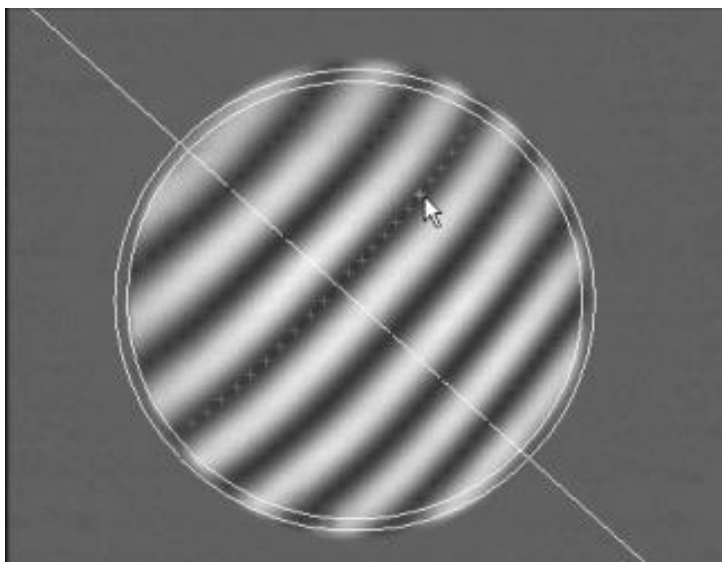


Рис. 40. Расстановка точек на интерференционных полосах

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

Также возможна расстановка точек на максимумах интерференционных полос, которую предпочтительно использовать при обработке качественных (не зашумленных, с равномерной фоновой 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 несущественно с какой стороны начинается нумерация полос, но обязательное условие восстановления функции деформации волнового фронта – точное соблюдение относительного изменения величины деформации волнового фронта. Для выполнения этого условия требуется, чтобы полосы имели сквозную нумерацию.

6. 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 (рис. 41).

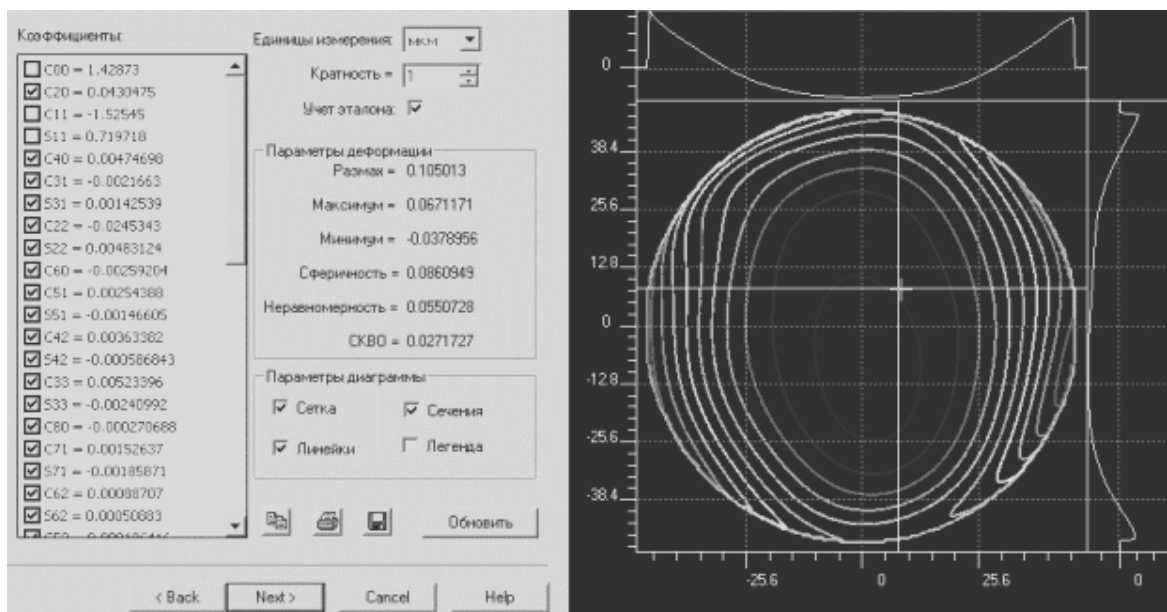


Рис. 41. Аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике

В зависимости от выбранного набора коэффициентов определяются все характеристики функции деформации волнового фронта: размах, максимальное и минимальное значения волнового фронта, среднеквадратическое отклонение (СКО) деформации, величина сферичности и нерегулярности.

В группе «Параметры деформации» отображаются основные параметры деформации волнового фронта. Размах, максимум, минимум и СКО вычисляются согласно выбранным коэффициентам деформации и выборки восстановленного волнового фронта. Сферичность и нерегулярность 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 горизонтального и вертикального сечений.

Программа Zebra Imager

Программа Zebra Imager предназначена для анализа характеристик качества оптического изображения.

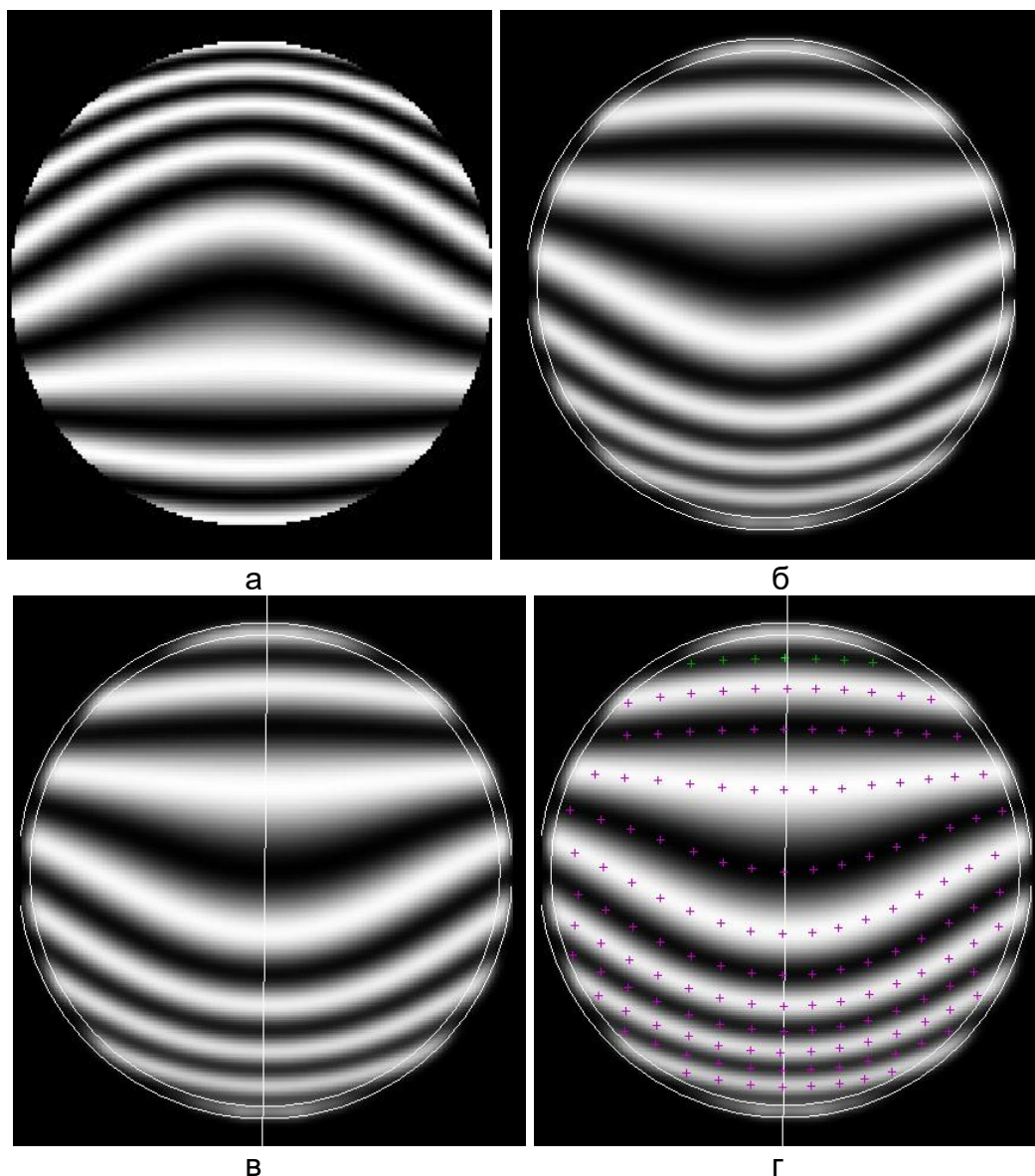
Основные возможности программы Zebra Imager – анализ характеристик качества оптического изображения:

- функции рассеяния точки (ФРТ);
- функции рассеяния линии (ФРЛ);

- функции концентрации энергии (ФКЭ);
 - пограничной кривой;
 - модуляционной передаточной функции (МПФ);
 - фазовой передаточной функции (ФПФ);
- а также моделирование формирования изображения стандартных тест-объектов (вертикальная или горизонтальная решетка, радиальная мира) и 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.

Полный цикл обработки типичной интерферограммы в пакете Zebra Imager показан на рис. 42.



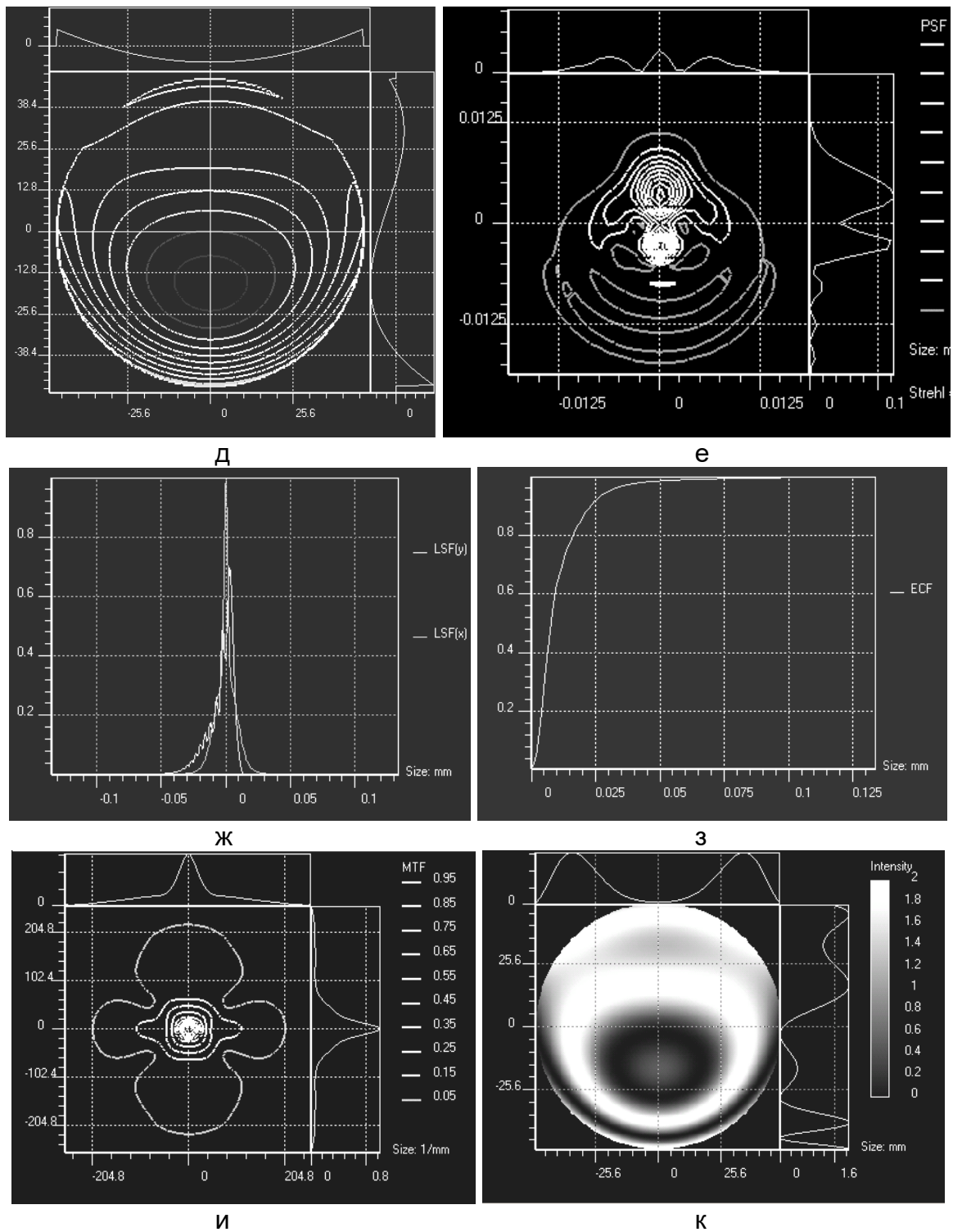


Рис. 42. Цикл обработки интерферограммы в пакете Zebra Imager: исходная интерферограмма (а); определение контура картины (б); определение линии сканирования (в); расстановка точек на экстремумах полос (г); карта функции деформаций волнового фронта (д); карта ФРТ для исследуемой системы (е); график ФРЛ для исследуемой системы (ж); график ФКЭ для исследуемой системы (з); карта и графики функции передачи модуляции (и); моделирование интерферограммы Ньютона (вид под пробное стекло) (к)

ИНТЕРФЕРОМЕТР С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ ПЛАСТИНКОЙ

Распространение лазеров привело к расширению использования интерференционного метода на 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.

Развитие голографической техники позволило создать интерферометр, свободный от указанных недостатков. Одним из таких приборов является интерферометр с рассеивающей пластинкой (рис. 43).

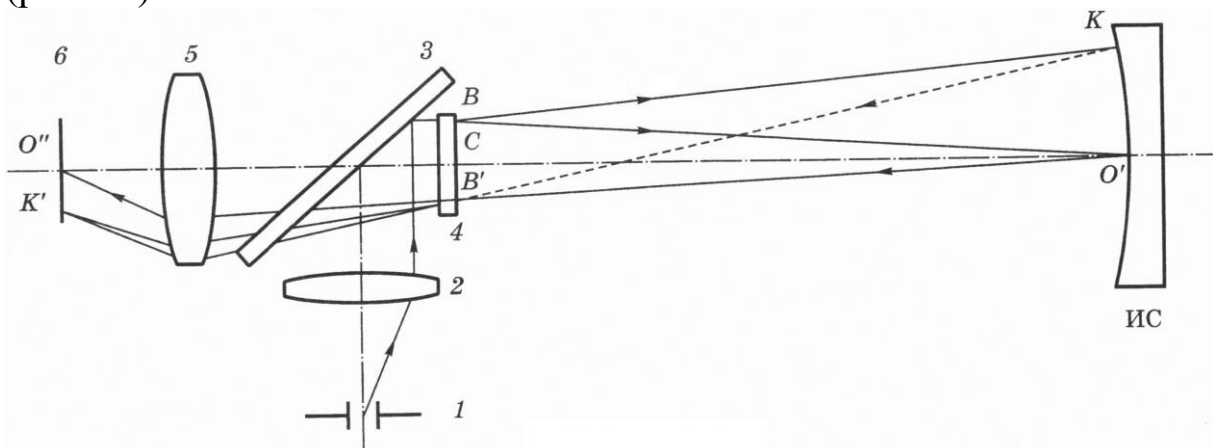


Рис. 43. Интерферометр с рассеивающей пластинкой

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 спекл-структуры. Техника изготовления такого рассеивателя несложна.

Принцип работы прибора

Пусть в точку K пришел один из лучей, рассеянных пластинкой (рис. 43). Отраженные в точках O' и K лучи приходят в точку B' на рассеивателе, симметричную точке B первичного рассеивания. Здесь происходит вторичное рассеивание, причем рассеянная составляющая луча из точки O' накладывается на нерассеянную составляющую луча из точки K' . 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 O'' 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 спекл-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} .

Методика изготовления рассеивателя состоит в двукратном экспонировании пластины в плоскости сложного интерференционного спекл-изображения, возникающего при прохождении расширенного лазерного пучка через матовое стекло. Схема установки, собранной в ОАО «ЛОМО» для изготовления рассеивающих пластин, приведена на рис. 44. 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.

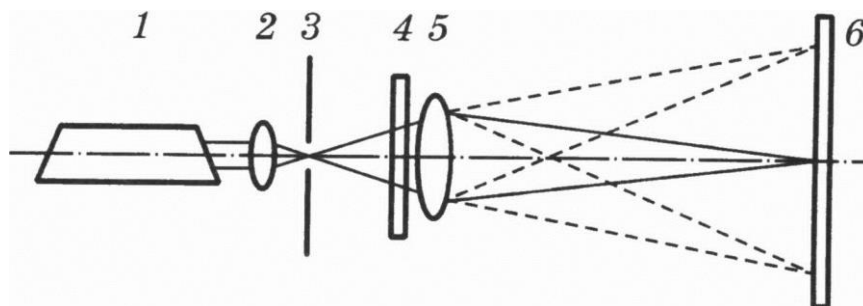


Рис. 44. Установка для изготовления голографической рассеивающей пластинки

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 $1-10$ 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 в начале из непрозрачного 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 0,2–0,3. Максимальная апертура контролируемой поверхности, достигнутая с применением полученных описанным способом рассеивателей, составила 0,15.

На ОАО «ЛОМО» усовершенствована первоначальная схема интерферометра. В модифицированной схеме (рис. 45) луч лазера 1 фокусируется объективом 2 в точку O в отверстии в центре сферической поверхности зеркального коллектива 5.

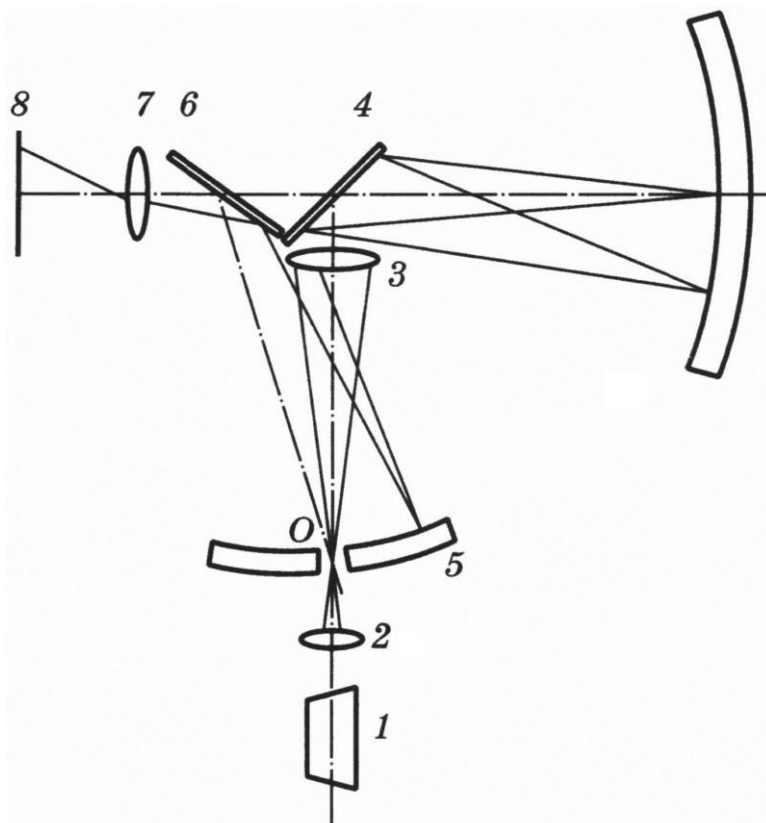


Рис. 45. Модифицированная схема интерферометра с рассеивающей пластинкой

Точка O 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 четырехкратный 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 $\frac{\lambda}{5} - \frac{\lambda}{10}$.

Принцип изготовления голографических рассеивающих пластин здесь также 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. 46, б, т.е. привести к случаю высокоточной биссекториальной наводки. Такое преобразование изображения (оконтуривание) может быть достигнуто применением фотографического процесса со специфической характеристической кривой (рис. 47). 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. 48.

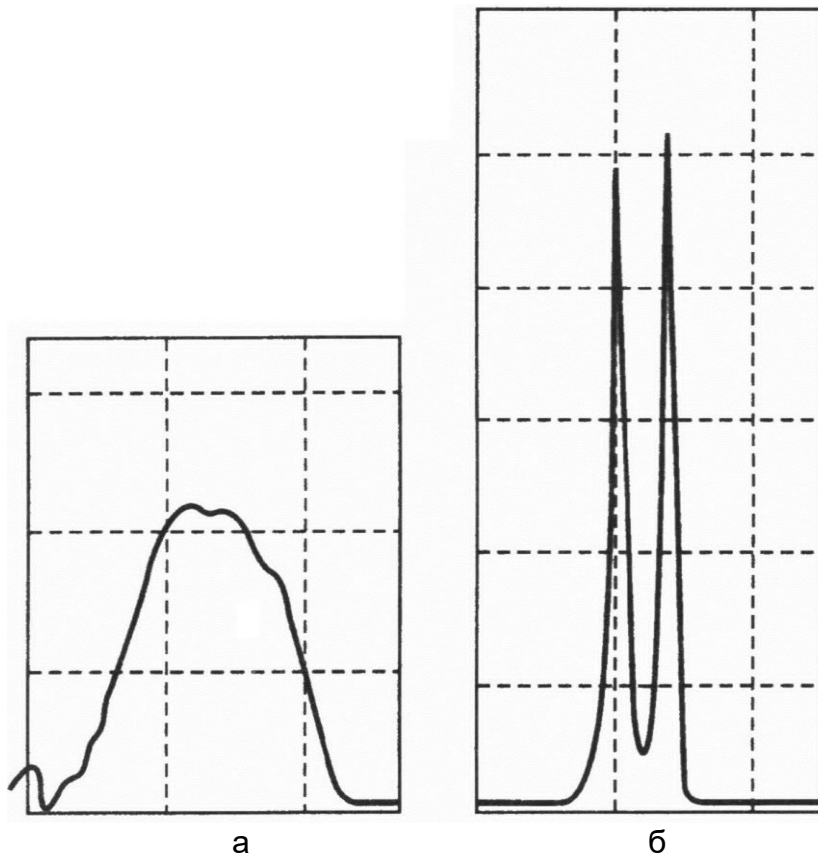


Рис. 46. Распределение плотности в интерферограмме: без дополнительной обработки (а); после оконтуривания (б)

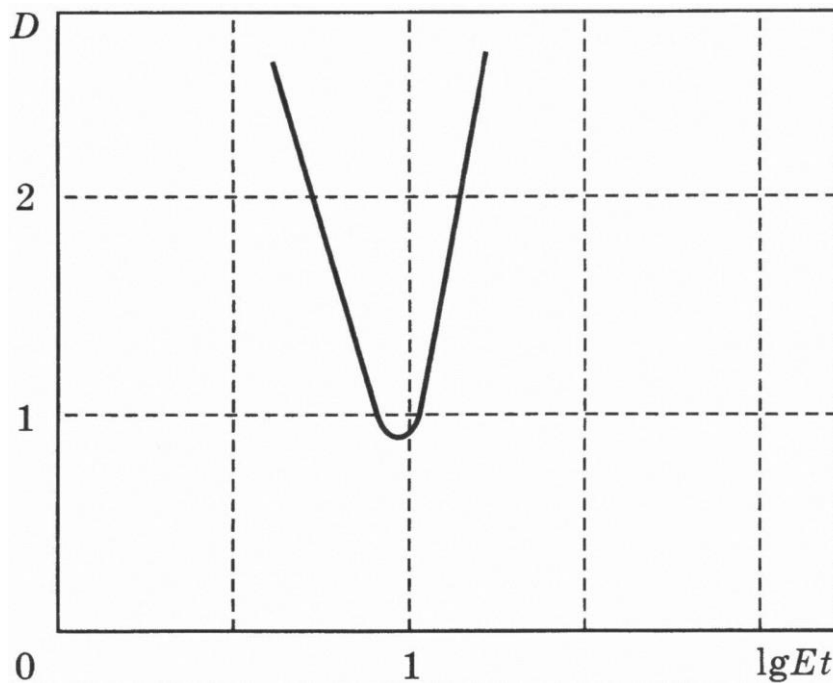


Рис. 47. Характеристическая кривая фотоматериала при обработке с эффектом Сабатье

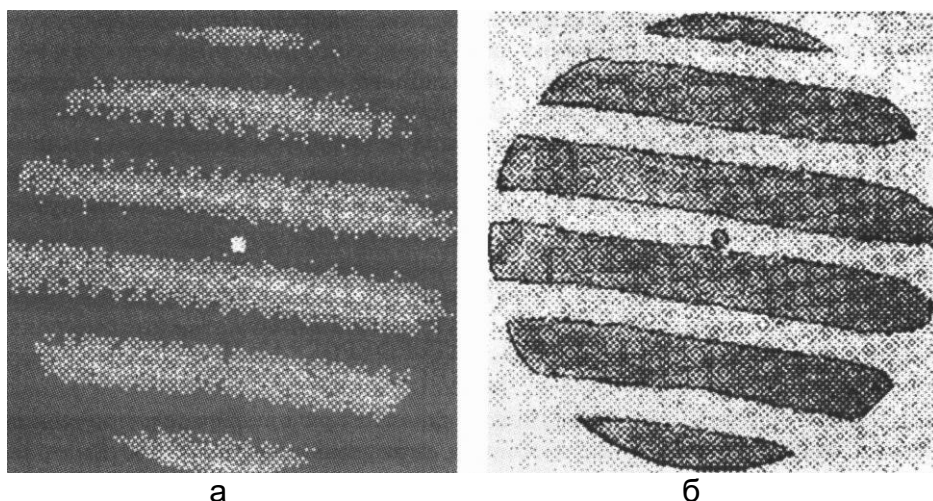


Рис. 48. Вид интерферограммы: без дополнительной обработки (а); после оконтуривания (б)

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 приведены в табл. 3.

Таблица 3. Погрешности расшифровки интерферограмм

Ширина интерференционной полосы, мм	Погрешность расшифровки		
	Без оконтуривания	После оконтуривания	
		Наводка на контур	Наводка на центр
1,0	0,32	0,32	0,30
3,0	1,35	0,05	0,02

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

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. 46, 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 гартманогаммы кольцеобразной формы. Здесь мы имеем случай, близкий к широко применяемой на практике бисекториальной 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. 46, а) в кольцеобразную (рис. 46, 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 гартманогаммы 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.

Разработанная установка для получения гартманограмм с использованием лазера позволяет на пять 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. 49. 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. 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.

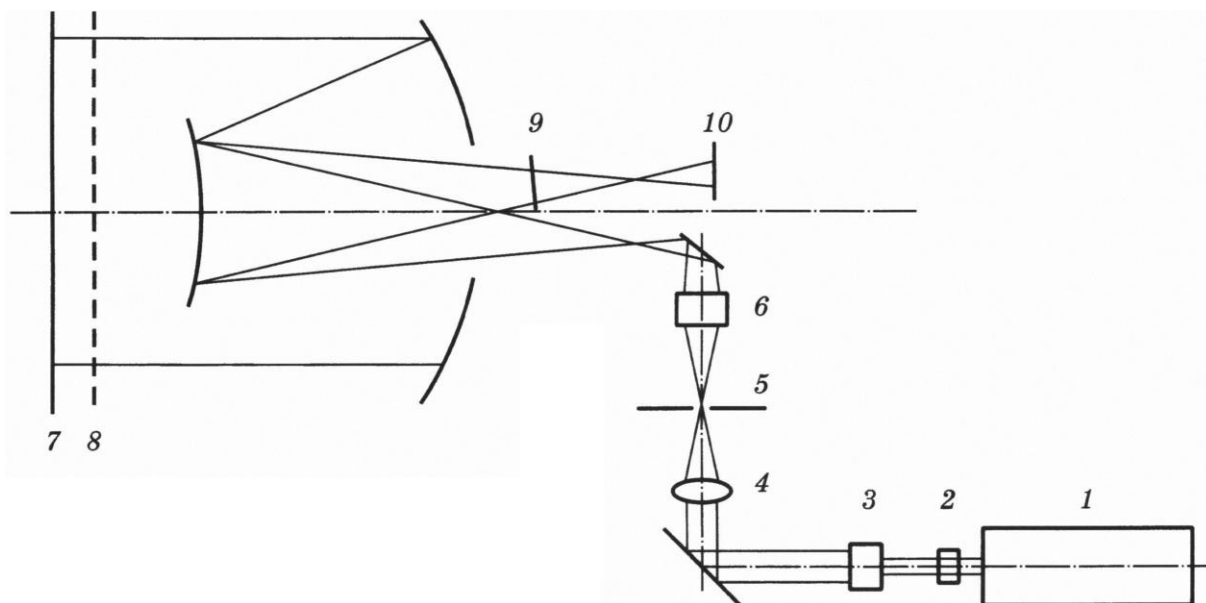


Рис. 49. Схема контроля оптического телескопа методом Гартмана с лазером

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.

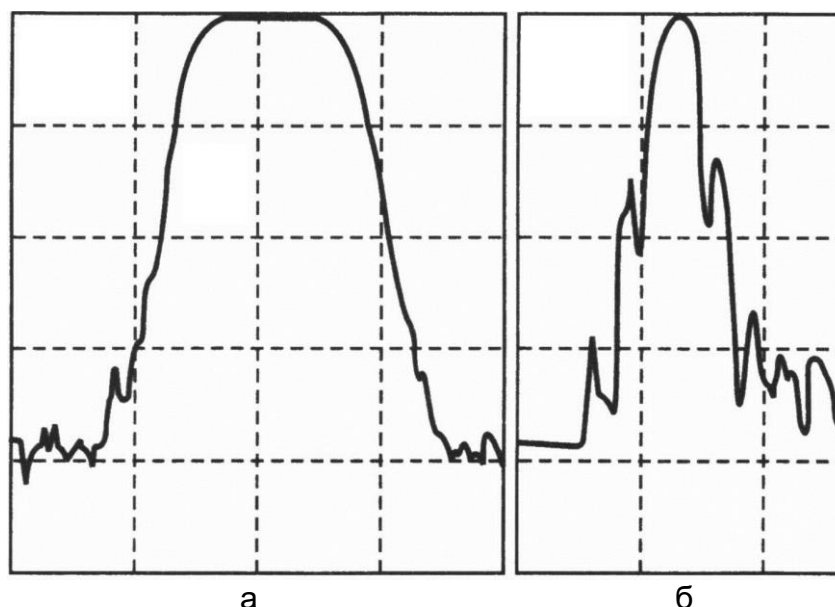


Рис. 50. Микрофотометрическая структура пятна гартманограммы: при длительной экспозиции (а); в схеме с лазером (б)

На рис. 50, а, показана микрофотометрическая структура пятна гартманограммы при длительной экспозиции, на рис. 50, б, – при

использовании установки по предложенной схеме. Исследовалась оптическая система телескопа АЗТ-11 с главным зеркалом диаметром 1,25 м, изготовленного на ОАО «ЛОМО» для Абастуманской астрофизической обсерватории.

При получении гартманограмм 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.

ИНТЕРФЕРОМЕТР С РЕШЕТКОЙ РОНКИ

Принцип метода

Принцип действия интерферометра (рис. 51) состоит в наложении и интерференции двух взаимно когерентных сферических волновых фронтов в режиме интерференции сдвига (рис. 52).

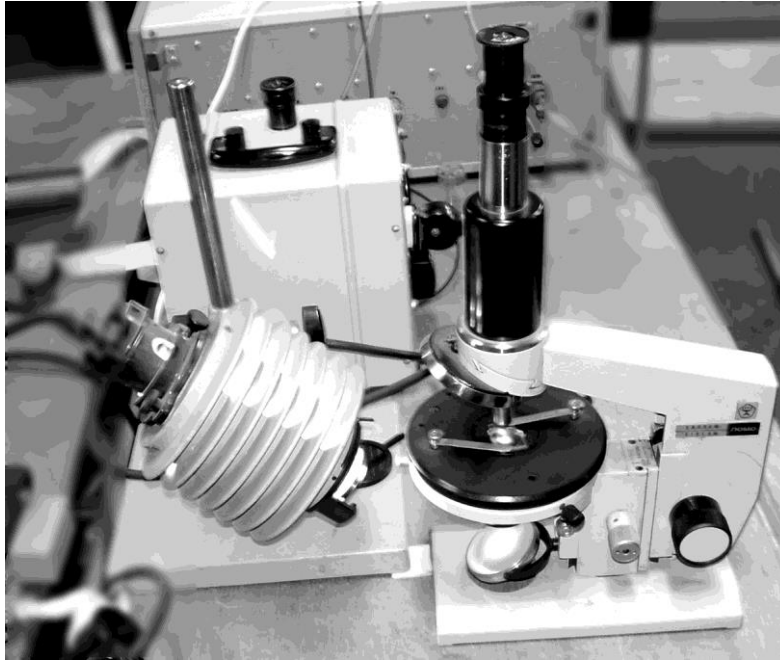


Рис. 51. Интерферометр Ронки для исследования ахроматических и хроматических aberrаций микрообъективов

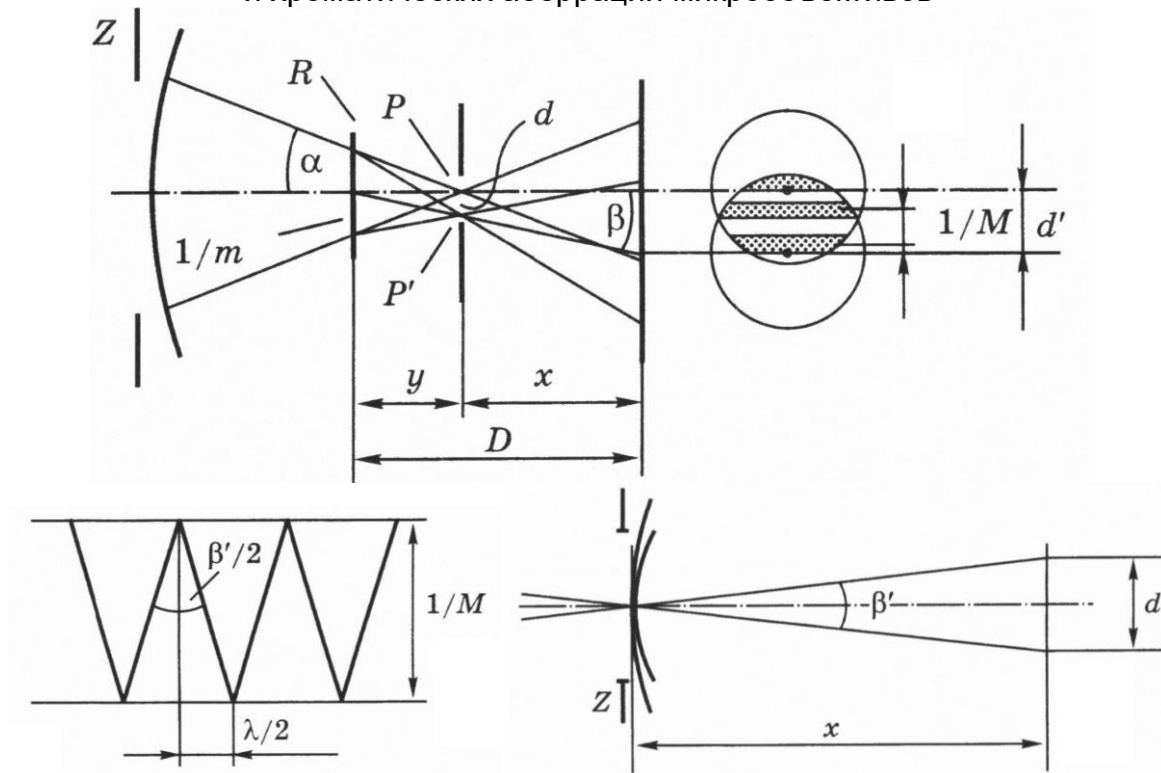


Рис. 52. Принцип действия интерферометра с решеткой Ронки

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 расстоянии 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

$$d = y\beta,$$

где β – угол дифракции.

$$\beta = m\lambda,$$

отсюда

$$d = ym\lambda. \tag{3}$$

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 (рис. 52).

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 (рис. 52, а). (Под углом β' наблюдаются дифракционные спектры P и P' из центра зрачка Z исследуемой оптической системы, рис. 52, б).

$$\beta' = \frac{d}{x}.$$

Расстояние между интерференционными полосами (шаг интерференционных полос) составляет

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda}{\beta'}, \tag{4}$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda x}{d}. \tag{5}$$

Имея в виду, что

$$d = ym\lambda,$$

находим, что

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda x}{ym\lambda};$$

$$\frac{1}{M} = \frac{x}{yt}$$

Отсюда получаем соотношение:

$$\frac{M}{y} = \frac{t}{x}. \quad (6)$$

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 (4).

Однако в процессе интерференции дифрагированных фронтов, наложенных под углом β' , то же увеличение λ влечет за собой, как видно из выражения (5), 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 теневым отображением штрихов решетки (рис. 53). Это же позволяет вести исследования на интерферометре данного типа с применением источника белого света.

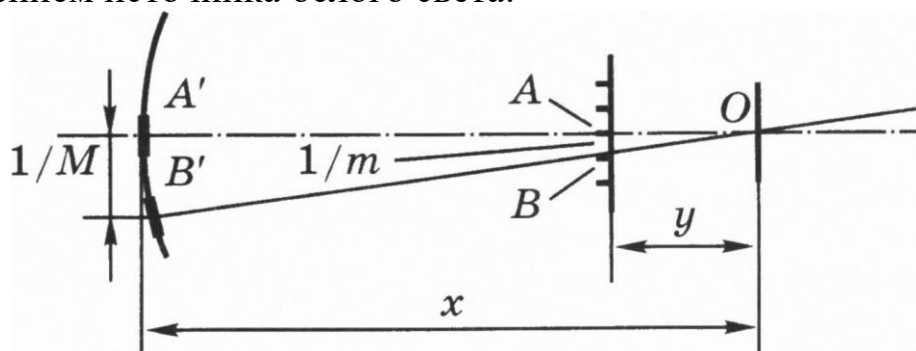


Рис. 53. Частота интерференционных полос связана с частотой решетки

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 aberrациях. Это

свойство данного интерферометра позволяет использовать его при исследованиях хроматизма.

Итак, частота интерференционных полос связана с частотой решетки соотношением:

$$M = \frac{ym}{x}$$

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 аберрациях 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 показана на рис. 54.

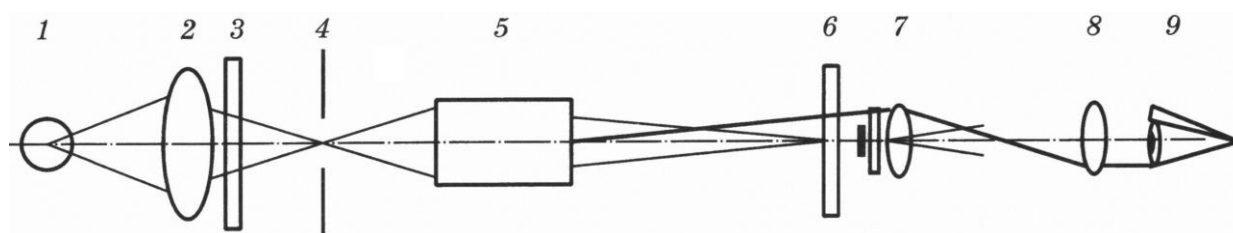


Рис. 54. Схема установки для исследования объектива микроскопа:
1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – светофильтр; 4 – точечная или щелевая диафрагма; 5 – исследуемый микрообъектив; 6 – дифракционная решетка; 7 – объектив наблюдательной системы; 8 – окуляр наблюдательной системы; 9 – глаз наблюдателя

Проведение исследований

Получить интерферограммы поочередно от двух 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» (рис. 55).

Число интерференционных полос можно менять с помощью продольных подвижек тубуса микроскопа.

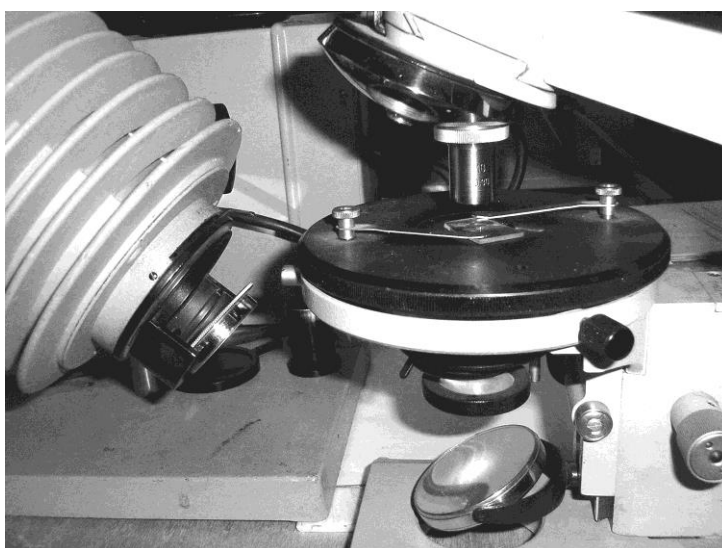


Рис. 55. Точечный препарат на предметном столике интерферометра по схеме Ронки содержит субмикронную щель, применяемую для формирования тест-объекта «светящаяся линия»

3. По виду интерференционной картины оценить характер aberrаций исследуемого микрообъектива (рис. 56).

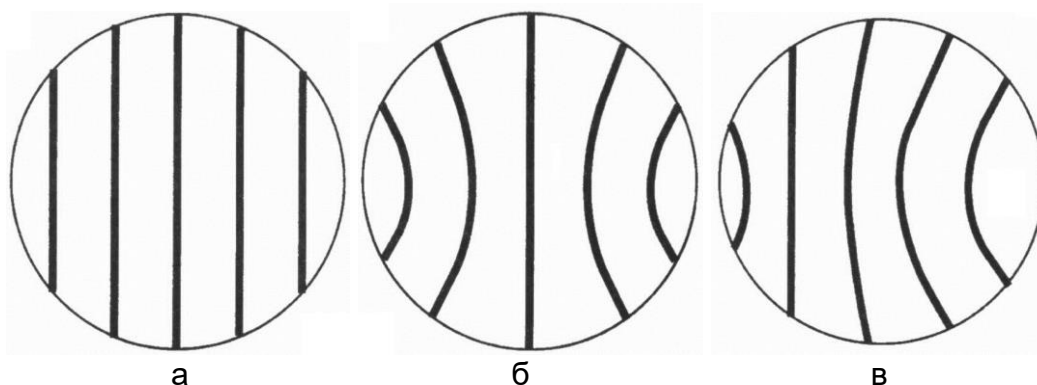


Рис. 56. Форма интерференционной картины Ронки в зависимости от характера aberrаций: отсутствие aberrаций (а); сферическая aberrация (б); кома (в)

4. Сопоставить характер и количественную оценку aberrаций данного микрообъектива, наблюдаемые на интерферометре Ронки, с характером и величиной aberrаций этого микрообъектива, определяемые параллельно на лазерном интерферометре с дифрагированной опорной волной.
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 (6)

$$\frac{M}{y} = \frac{m}{x},$$

значение y составит

$$y = \frac{Mx}{m},$$

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

Для двух исследуемых длин волн имеем

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

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

Хроматическая разность методом в интерферометре Ронки определяется как

$$\Delta y_{\lambda} = y_{\lambda_1} - y_{\lambda_2}.$$

Методика проведения измерения

1. Измерить величину $d_{\text{зм}}$ – диаметр зрачка исследуемого микрообъектива.
2. Наблюдая интерферограмму (рис. 57), сосчитать число полос $n_{\text{ин}}$ (с долями), по диаметру изображения зрачка (до раздвоения справа).

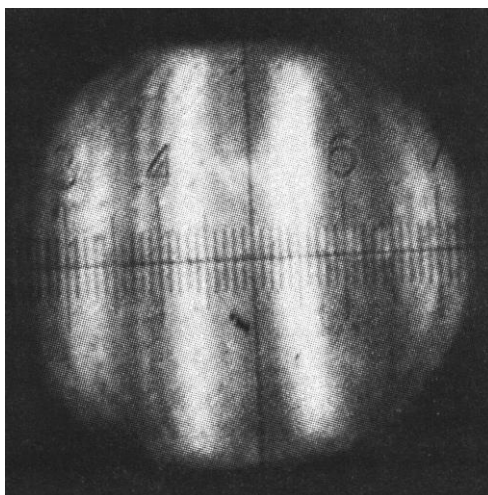


Рис. 57. Интерферограмма Ронки

3. Определить частоту M полос интерферограммы как

$$M = n_{\text{ш}} / d_{\text{зм}}.$$

При определении хроматизма:

- измеряется – $n_{\text{ш}\lambda_1}, n_{\text{ш}\lambda_2}$;
- определяется – $M_{\lambda_1}, M_{\lambda_2}$.

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

$$M = \frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{\text{мм}} \right),$$

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.

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

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

$$n_{\text{ш}} = p_{31} - p_{32},$$

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

5. Хроматическая разность определяется как

$$\Delta y_{\lambda} = \frac{x}{m} (M_{\lambda_1} - M_{\lambda_2}).$$

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:

$$N = \frac{2L_{\text{п}}}{\lambda},$$

где N – число полос, на которое смещается интерференционная картина; $L_{\text{п}}$ – 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 $632,8 \text{ нм}$ виброперемещение исследуемой поверхности не должно превышать $0,1 \text{ мкм}$.

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 покaдрово результаты регистрации, выбрать из ряда кадров отдельные снимки приемлемого качества (рис. 58), пригодные к дальнейшей обработке и интерпретации.

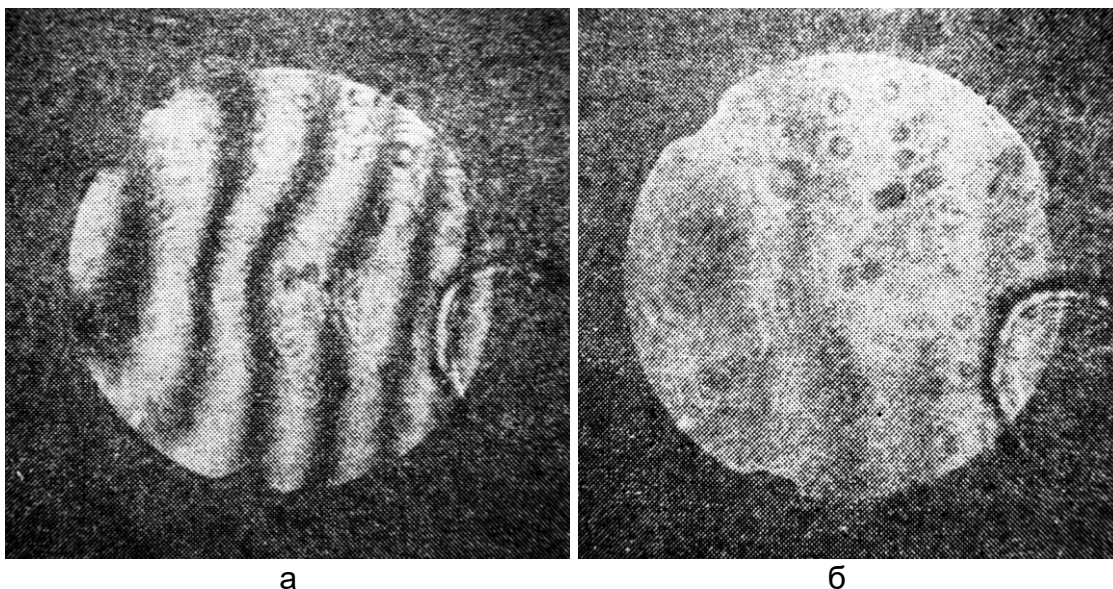


Рис. 58. Фоторегистрация интерферограммы при значительных вибрациях в схеме контроля: удачный снимок (а); неудачный (б)

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, вывешенный на накачанных автомобильных камерах.

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. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
2. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 65 с.
3. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1989. – 50 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОБ ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОШИБОК ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	6
Теневой метод Фуко	6
Метод Гартмана	7
Интерферометрия	8
ИНТЕРФЕРОМЕТР ТВАЙМАНА.....	11
ИНТЕРФЕРОМЕТР ФИЗО.....	13
Контроль плоской поверхности.....	13
Контроль сферической поверхности.....	14
Методика проведения измерений.....	15
ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА.....	20
ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИЕЙ НА ТОЧЕЧНОМ ОТВЕРСТИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОШИБОК ФОРМЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	24
Дифракционный интерферометр Линника.....	25
Неравноплечий дифракционный интерферометр.....	27
ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ ДИФРАГИРОВАННОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА.....	31
ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ..	36
Анализ погрешностей метода интерферометрии.....	40
ВЫСОКОТОЧНАЯ ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ.....	45
КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕРА С ДИФРАГИРОВАННЫМ ОПОРНЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ.....	51
УНИФИЦИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОЙ АСТРООПТИКИ.....	54
Назначение.....	54
Устройство и работа интерферометра. Принцип действия и оптическая система.....	54
Порядок установки и подготовка к работе.....	58

Методика метрологической аттестации интерферометра ПК-881..	58
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ	
ИНТЕРФЕРОГРАММ.....	60
Компьютерные методы.....	60
Основные возможности программы.....	61
Основные правила работы с программой.....	61
Программа Zebra Imager.....	64
ИНТЕРФЕРОМЕТР С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ	
РАСSEИВАЮЩЕЙ ПЛАСТИНКОЙ.....	67
Принцип работы прибора.....	68
Снижение погрешностей расшифровки интерферограмм	
средствами прикладной фоторегистрации.....	71
СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСШИФРОВКИ	
ГАРТМАНОГРАММ.....	74
РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА	
ГАРТМАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРА.....	76
ИНТЕРФЕРОМЕТР С РЕШЕТКОЙ РОНКИ.....	79
Принцип метода.....	79
Характеристики установки для исследования объектива	
микроскопа.....	82
Проведение исследований.....	82
Методика проведения измерения.....	84
СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ	
ПРИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
ЛИТЕРАТУРА.....	90

**Владимир Константинович Кирилловский
Татьяна Вячеславовна Точилина**

Оптические измерения.

Часть 5. Аберрации и качество изображения

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 13.02.2019

Заказ № 2476

Тираж 20

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49