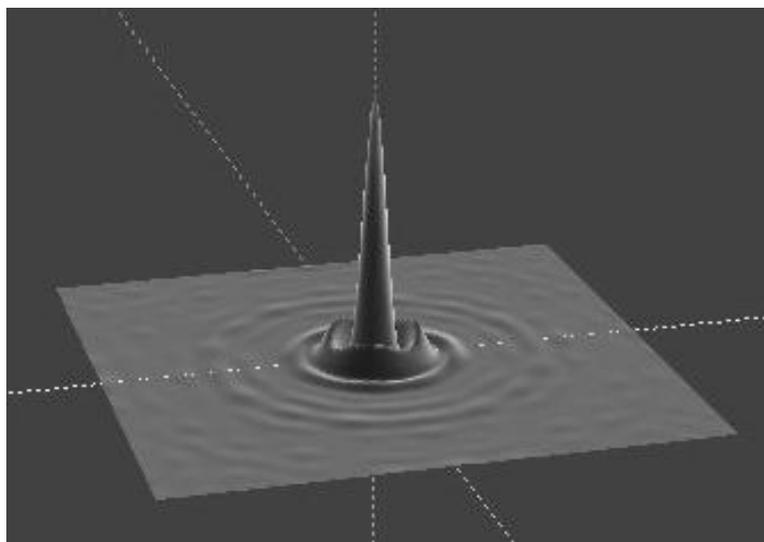
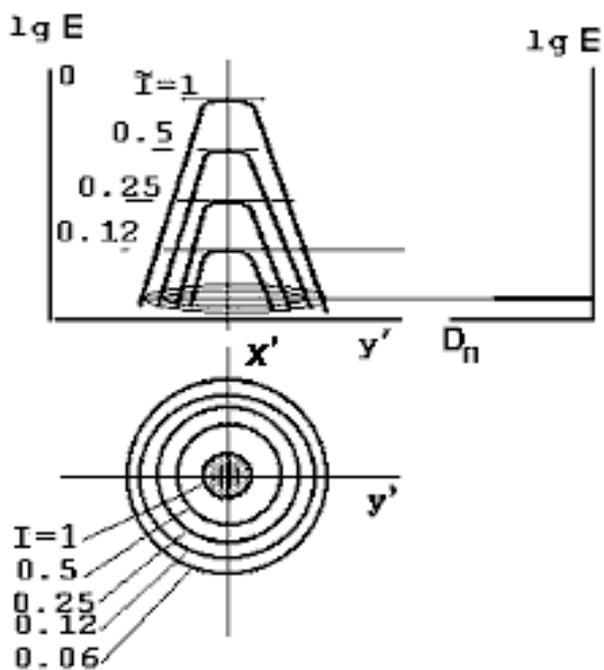


В.К.Кирилловский, М.Е.Зацепина

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Санкт – Петербург  
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

В.К.КИРИЛЛОВСКИЙ, М.Е.ЗАЦЕПИНА

# МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие к лабораторному практикуму



Санкт – Петербург  
2013

**В.К.Кирилловский, М.Е.Зацепина. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.**

Учебное пособие к лабораторному практикуму. – СПб НИУ ИТМО. 2013 – 98 с.

В пособии рассматриваются принципы и схемные решения аппаратуры, принципы методов оценки качества оптического изображения и измерения его характеристик, включая инновационные решения, предпосылки компьютерного моделирования этих средств исследований и контроля.

В данном учебном пособии приведены сведения о методах измерений и контроля, свойствах аппаратуры измерений, методики и средства для обработки результатов наблюдений, а также вопросы для контроля знаний студентов. Показаны пути применения лазеров, нетрадиционные пути использования различных дифракционных элементов, средств телевизионной и компьютерной техники. Показаны примеры анализа и синтеза оригинальных методов и схемных решений средств оценки качества изображения, даваемого оптическими системами и элементами. Показаны инновационные решения методов и аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей.

Учебное пособие предназначено для студентов оптических специальностей, изучающих методы оптических измерений по направлению подготовки 200400 «Опготехника», образовательная программа 200400.68.06 "Компьютерная оптика", 200400.68.01 "Прикладная оптика", 200400.68.16 "Оптические приборы", а также может быть полезным для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и технологов оптического производства.

Учебное пособие подготовлено на кафедре Прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и опготехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200400 "Опготехника", протокол №8 от 25.11. 2011 г.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009 – 2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

©Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

©В.К.Кирилловский, М.Е.Зацепина, 2013

## Введение

Данное учебное пособие содержит теоретические основы и лабораторные работы по курсу «Методы исследования и контроля качества оптических систем». В нем рассмотрены принципы методов оценки качества оптического изображения и измерения его характеристик.

Описания работ включают теоретическую часть, в которой изложены основы методов измерений, пояснения принципа действия устройства, задания на исследование, технические характеристики средств измерений, а также методики измерений. В конце каждой работы представлен список вопросов для самоконтроля.

В процессе выполнения лабораторных работ студентами по указанию руководителя должны выполняться все или часть пунктов задания.

При этом используются однократные, многократные или технические измерения. Вид измерений выбирается исполнителем на основании методических указаний и технических характеристик, приведенных в описаниях работ. В указаниях имеются также общие рекомендации по выполнению работ и справочные данные.

В качестве примера источников, используемых в качестве учебно-методических пособий к лабораторному практикуму по дисциплине «Методы исследования и контроля качества оптических систем» можно указать следующие:

1. В.К. Кирилловский. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб ГУ ИТМО. 2005.- 67с.
2. В.К. Кирилловский Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. СПб ГУ ИТМО. 2006.-115с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРООБЪЕКТИВОВ НА ЛАЗЕРНОМ ТЕЛЕВИЗИОННОМ ИЗОФОТОМЕТРЕ

## Теоретический материал

### Принцип метода

Сущность этого способа изофотометрии состоит в том, что изображение, построенное исследуемой системой, многократно регистрируют с помощью телевизионной системы, работающей в режиме выделения контура при ее постоянных световых характеристиках (рис. 2). При этом задаются разные уровни светового потока от точечного источника света в схеме установки.

Построенное исследуемым микрообъективом изображение точки переносится с увеличением с помощью вспомогательной системы наблюдательного микроскопа на чувствительную площадку телевизионной камеры, включенной в замкнутую телевизионную систему. Световой поток в системе изменяется по заданному закону с помощью кругового фотометрического клина.

Световой поток в схеме контроля при прочих равных условиях пропорционален пропусканию фотометрического клина. Относя текущие значения коэффициента пропускания  $\tau_i$  к величине коэффициента пропускания, соответствующего выделению в системе изофотометра максимума освещенности анализируемого изображения  $\tau_0$ , получим выражение для относительного пропускания:

$$\tau_{отн} = \frac{\tau_i}{\tau_0}$$

Таким образом, получаем:

$$E_i = \frac{1}{\tau_{отн}}$$

или, в логарифмической форме:

$$\lg E_i = -\lg \tau_{отн}$$

Из этих соотношений видно: чтобы проанализировать распределение освещенности в исследуемом изображении до уровня  $0,001E_{\max}$ , необходимо ослабить световой поток в схеме контроля в 1000 раз, причем полученный уровень освещенности должен быть достаточным для работы приемника изображения. Следовательно, точечный источник в схеме контроля должен обладать достаточно высокой яркостью. Такой источник формируется с помощью лазера.

## Компьютерная изофотометрия ФРТ

Схема установки для контроля ФРТ фото - видео-объектива в положении наименьших aberrаций показана на рис.1.

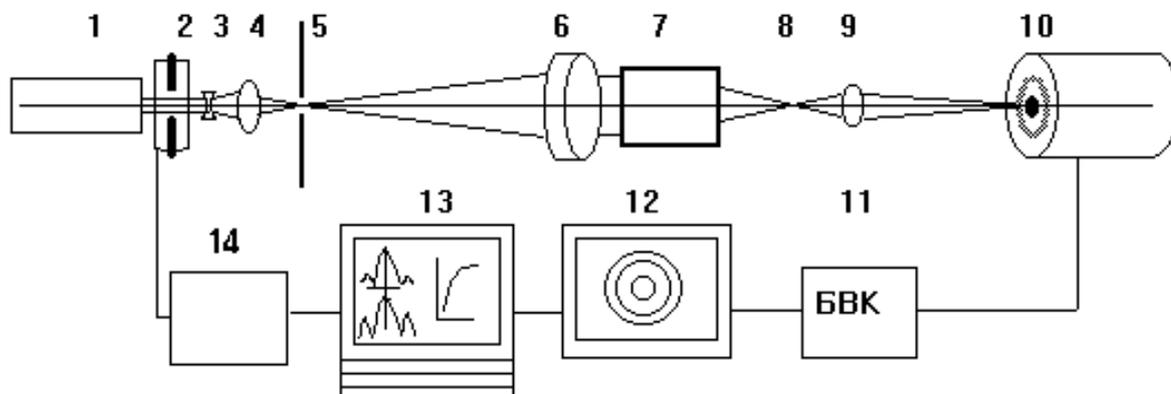


Рис. 1. Установка для измерения ФРТ объектива фото-видеокамеры в положении наименьших aberrаций методом изофотометрии с накоплением

- 1 - лазер, 2 - световой затвор, 3 и 4 - объектив для фокусировки лазерного пучка,
- 5 - точечная диафрагма, 6 - объектив коллиматора, 7- исследуемый объектив,
- 8 - изображение точечного тест - объекта (пятно рассеяния),
- 9 - проекционный микро-объектив,
- 10 - приемник изображения (телевизионная камера),
- 11 - электронный блок обработки видеосигнала,
- 12 - телевизионный монитор, 13 - компьютер,
- 14 - электронный блок управления регистрацией.

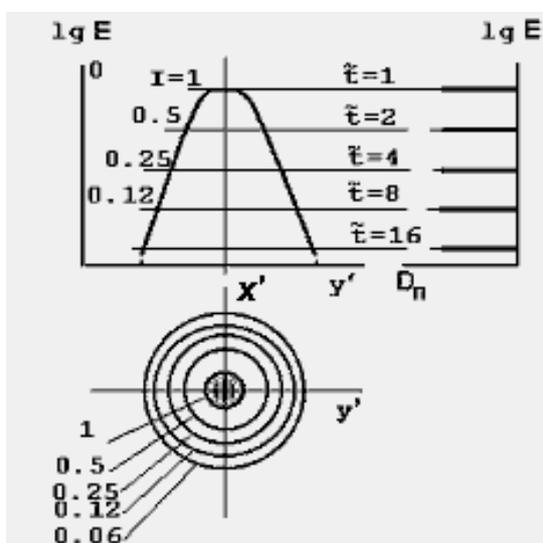


Рис. 2. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотограммы

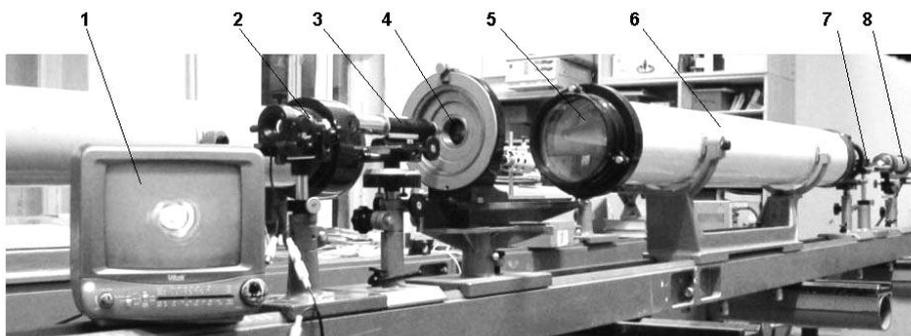


Рис. 3. Общий вид установки для изофотометрии с изменяющимся световым потоком ФРТ объектива фото-видеокамеры

- 1 – TV - монитор,
- 2 – TV- камера,
- 3 – микроскоп,
- 4 – держатель с исследуемым объективом,
- 5 – объектив коллиматора,
- 6 - коллиматор,
- 7 - тест - объект,
- 8 - осветитель

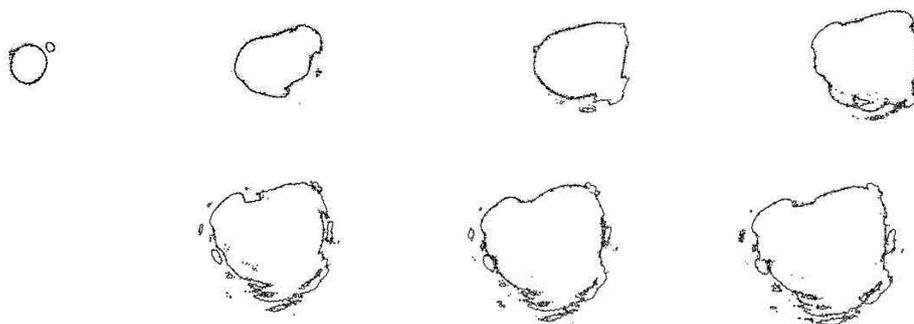


Рис. 4. Серия изофот

ФРТ характеризуется плавным распределением освещенности. В то же время, при проведении изофотометрии измерения ФРТ получают лишь ограниченное число значений функции в ряде характерных точек. Например, распределение освещенности в оптическом изображении пятна рассеяния можно охарактеризовать конечным числом замкнутых кривых – изофот (рис.4). Каждая изофота есть геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты и равное значение координаты относительной освещенности. Формирование изофот исследуемого оптического изображения осуществляется благодаря применению приемника изображения, обладающего функцией преобразования типа "импульс" (рис.2).

Общий вид изофотометра ФРТ показан на рис. 3.

Как показывают проведенные исследования, для получения системы изофот исследуемого распределения освещенности необходимо использовать функции преобразования типа "гребенка" (по-латински - COMB) (рис. 2). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов.

Схема установки для исследования качества фотообъектива методом изофотометрии с изменяющимся световым показана на рис.3. Здесь же показан общий вид установки и ряд полученных изофот.

В изофотометре с изменяющимся световым потоком оперативность измерений достигнута за счет формирования всех фотометрических сечений при одинаковых временах экспозиции, составляющих 1/50 с.

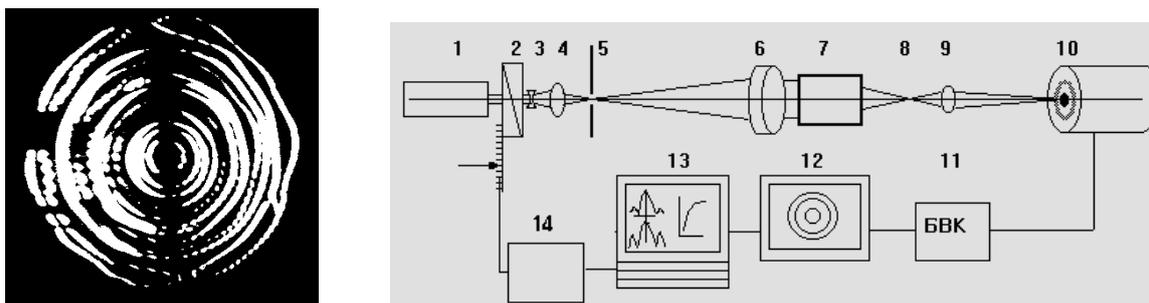


Рис. 5. Схема установки для изофотометрии с изменяющимся световым потоком ФРТ объектива фото-видеокамеры

- 1 --лазер,
- 2 - фотометрический клин с устройством отсчета действующей оптической плотности;
- 3 и 4 - объектив для фокусировки лазерного пучка, 5 - точечная диафрагма,
- 6 - объектив коллиматора, 7- исследуемый объектив,
- 8 - изображение точечного тест - объекта (пятно рассеяния),
- 9 - проекционный микро-объектив,
- 10 - приемник изображения (телевизионная камера),
- 11 - электронный блок обработки видеосигнала,
- 12 - телевизионный монитор, 13 - компьютер,
- 14 - электронный блок управления регистрацией.

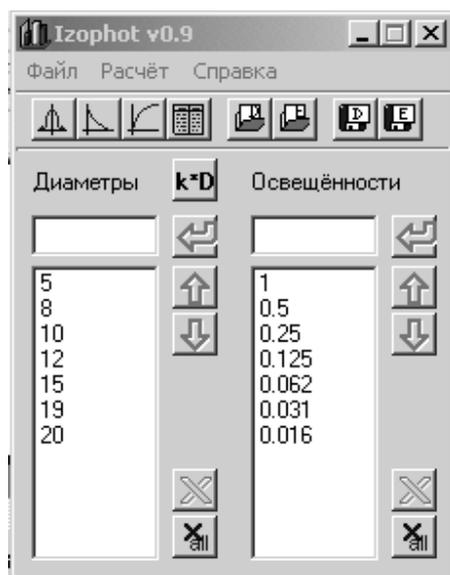
В исходном состоянии фотометрический клин введен полностью; чувствительность телевизионной системы установлена таким образом, чтобы исходный световой поток в схеме контроля формировал изображение линии равного уровня освещенности (изофоты) в изображении точечного источника, соответствующее максимуму освещенности, которая принимается равной единице. Обычно изофота максимума имеет вид точки (на рис. 2 это центральная изофота).

Изофотометр позволяет в процессе фокусировки и юстировки системы следить за изменением качества изображения по форме графика ФРТ и точно определять оптимальное положение, соответствующее наилучшему качеству изображения.

Применение компьютера создает возможности автоматизации управления клином, формирования карты и графика ФРТ, считывания и обработки результатов.

На рис. 6 показаны результаты компьютерной обработки результатов изофотометрии ФРТ программой, разработанной совместно со студентом А. Федоровым.

Табличная форма



Графическая форма

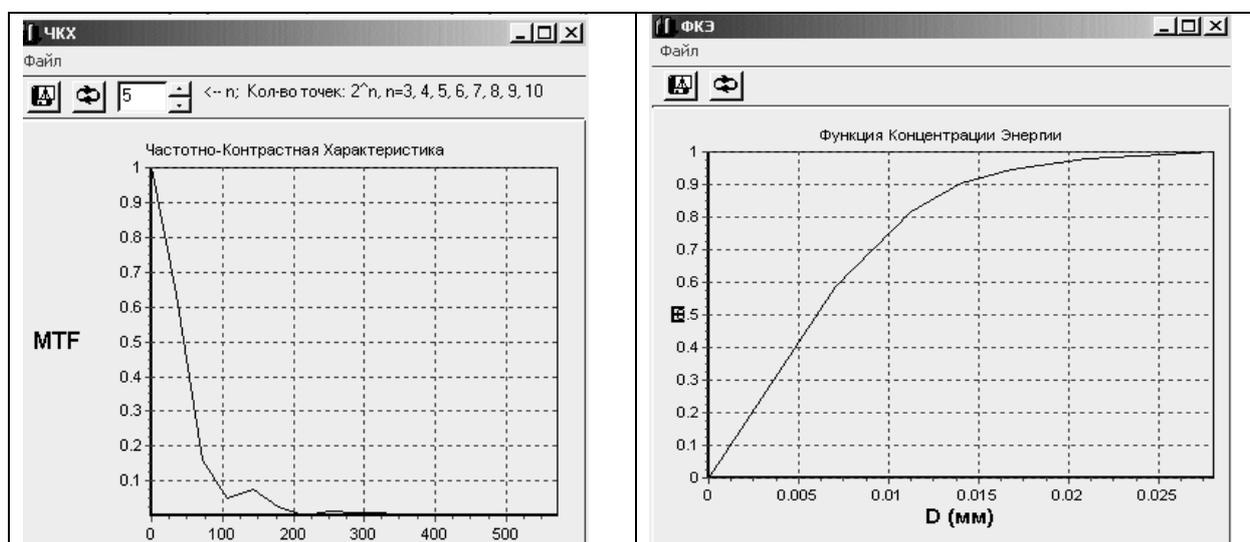
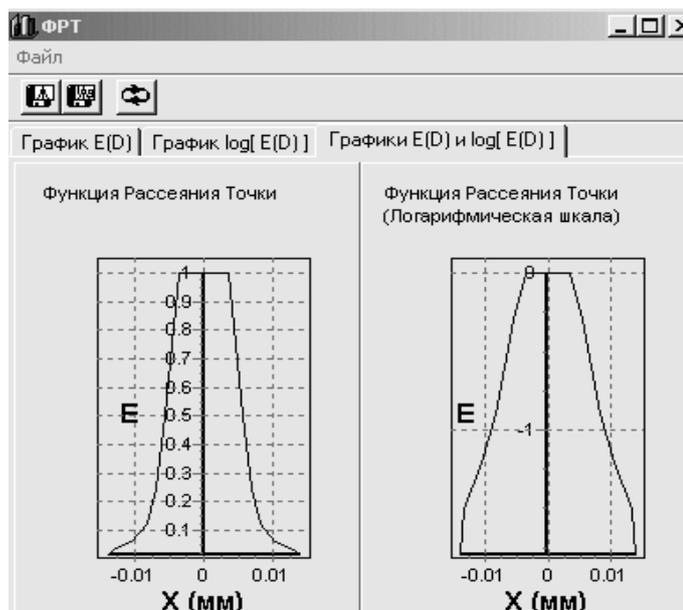


Рис.6. Расчет функции передачи модуляции и функции концентрации энергии

Программа дает возможность, после ручного ввода данных в процессе измерения семейства изофот, отображать ФРТ в виде графиков в логарифмическом и линейном масштабе по оси относительных освещенностей. Далее программой выполняется расчет функции передачи модуляции и функции концентрации энергии для исследуемой оптической системы и их отображение в графической и табличной формах (рис.6).

### Контрольные вопросы по теоретической части

Поясните сущность метода изофотометрии

Поясните, что происходит с изображением точки, построенным исследуемым микрообъективом.

Укажите, как находится световой поток в схеме контроля.

Укажите выражение для относительного пропускания

Что представляет собой точечный источник в схеме контроля?

Сколько значений функций в ряде характерных точек можно получить при проведении изофотометрии измерения ФРТ?

Что есть изофота?

Поясните процесс формирования изофот.

Что есть функция «гребенка»?

Как выглядит изофота максимума?

Какие функции выполняет программа изофотометрии?

## Лабораторная работа

### Задание для работы

1. Отъюстировать схему изофотометра с контролируемым объективом  $20 \times 0,40$ .
2. Выполнить качественное исследование характера дифракционного кружка и его изофотограммы по изображениям на телеэкранах.
3. Измерить диаметры изофот.
4. Получить таблицы и графики функции рассеяния точки (ФРТ) и функции концентрации энергии (ФКЭ) обработкой данных на компьютере.

### Схема установки

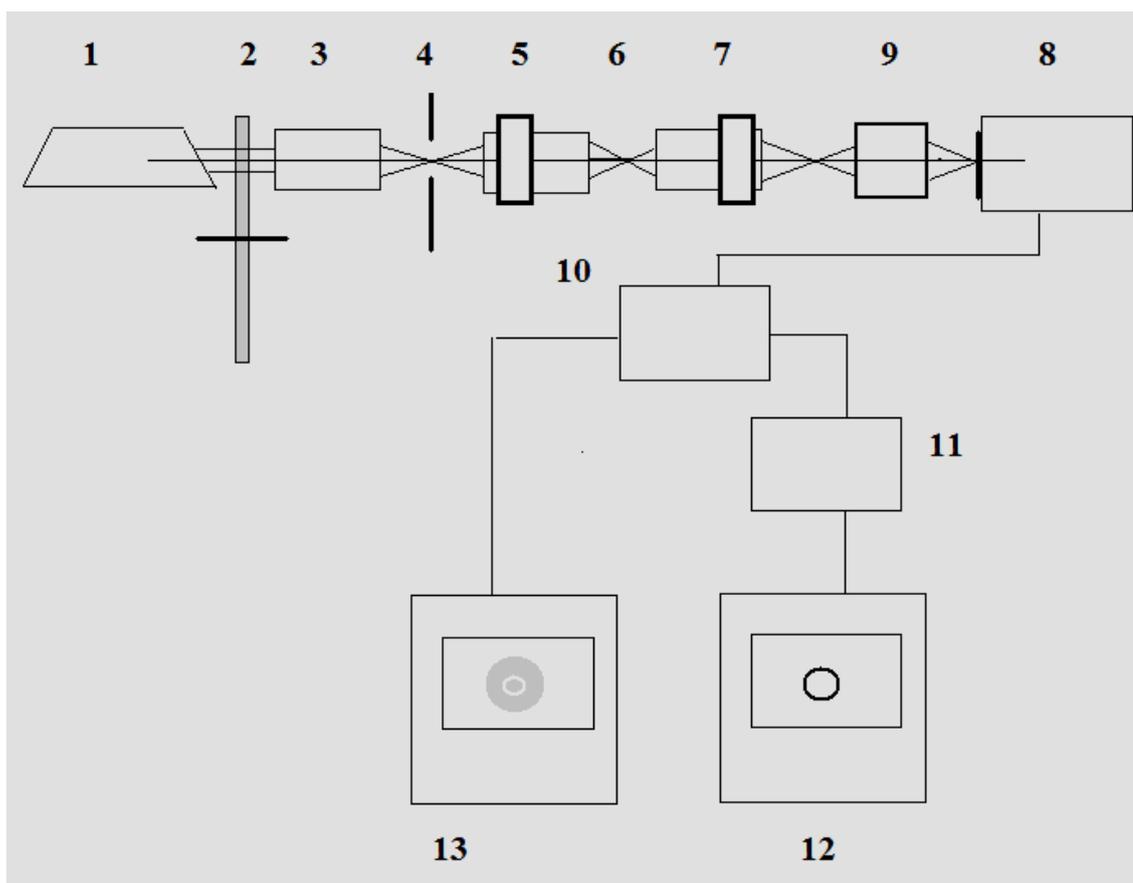


Рис. 7 Схема изофотометра

- 1 - лазер
- 2 - круговой фотометрический клин
- 3 - осветительный объектив
- 4 - точечная диафрагма

- 5 - микрообъектив - формирователь точечного источника
- 6 - точечный источник
- 7 - контролируемый объектив
- 8 - окуляр наблюдательной системы
- 9 - видикон передающей телекамеры
- 10 - блок усилителя - формирователя видеосигнала
- 11 - блок выделения контура
- 12 - видеоконтрольное устройство 1 (с изофотой)
- 13 - видеоконтрольное устройство 2 (с пятном рассеяния).

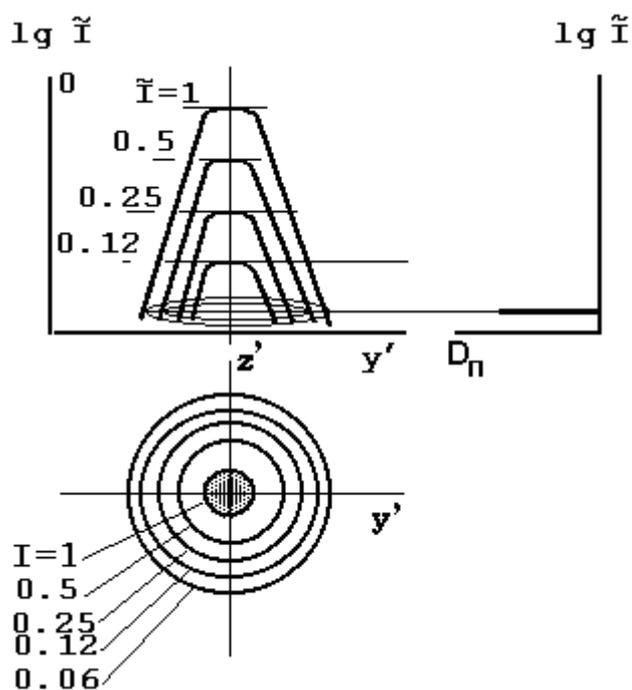


Рис. 8. Схема метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком

### Технические характеристики установки

1. Источник света - гелий-неоновый лазер ЛГ -78.
2. Диаметр лазерного пучка - 2 мм.
3. Диаметр точечной диафрагмы - 0,02 мм.

### Проведение измерений

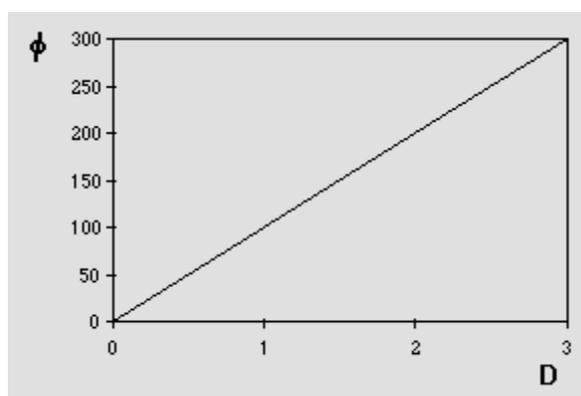


Рис. 9 Калибровочный график клина

Поворотом фотометрического клина на угол  $\varphi$  установить отображение на TV - экране изофоты заданного уровня  $E_{отн}$

По калибровочному графику клина из угла  $\varphi$  найти значения оптической плотности  $D$  (рис. 2).

Рассчитать, пользуясь компьютером, значение  $E_{отн}$ .

Как видно из калибровочного графика, для данного клина действует соотношение:

$$D = 0.01 \cdot \varphi.$$

Измерить по телевизионному экрану диаметры изофот  $d_{II}$ . Рассчитать реальный диаметр изофоты исходя из увеличения  $V_T$ .

Данные ввести в таблицу компьютера

Получить распечатки ФРТ и ФКЭ.

Расфокусировать и снова настроить в плоскость наилучшей установки исследуемый объектив. Повторить измерения и обработку. Оценить разброс значений ФРТ и ФКЭ.

Измерить аналогично 2-й образец объектива.

### Отчет

В отчете должны быть представлены:

- схема установки
- краткое описание метода
- таблица результатов измерений, выраженных в числе интерференционных полос, числе длин волн и в микрометрах.

### Контрольные вопросы по лабораторной работе

Поясните, в чем состоит принцип интерферометра

Укажите, как используется фотометрический клин в схеме интерферометра.

Назовите основные узлы в схеме установки

Укажите, с какой целью в схеме интерферометра установлены два видеоконтрольных устройства?

Укажите, какой источник света используется в схеме.

Назовите, чему равен диаметр точечной диафрагмы.

Поясните, как можно получить реальный диаметр изофоты.

### Литература

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб ГУ ИТМО. 2005.- 67с.
2. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. ЛИТМО. 1989.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.:Машиностроение.1983.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТООБЪЕКТИВОВ НА ТЕЛЕВИЗИОННОМ ИЗОФОТОМЕТРЕ ПО ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ЛИНИИ (ФРЛ)

## Теоретический материал

### Принцип метода

Сущность этого способа изофотометрии состоит в том, что в качестве тест - объекта в коллиматоре установлена щель с линейным фотометрическим клином, ось которого совпадает с расположением щели. При этом формируется тест - объект "светящаяся линия переменной яркости".

Построенное исследуемым объективом изображение этого тест - объекта переносится с увеличением при помощи вспомогательного микрообъектива на чувствительную площадку передающей телевизионной трубки, включенной в замкнутую телевизионную систему (ТВС), работающую в режиме выделения контура при ее постоянных световых характеристиках, для чего в составе ТВС подключен блок выделения контура (БВК), выделяющий изофоту изображения линии переменной яркости. Эта изофота имеет форму графика функции рассеяния линии (ФРЛ) исследуемого объектива, где по оси ординат располагаются значения логарифма относительной освещенности ( $\lg E_{\text{омн}}$ ).

Так как график ФРЛ ( $E_{\text{омн}} = f(y')$ ) формируется на экране телевизионного монитора в реальном масштабе времени, данная установка позволяет оперативно определять плоскость наилучшей установки (фокусировки) объектива, осуществлять его юстировку до достижения наилучшего качества изображения и оценивать качество изображения по ширине ФРЛ и соответствующему значению ФРС.

### Контроль качества изображения по функции рассеяния линии

Наряду с функцией рассеяния точки, первичным критерием качества изображения оптической системы является распределение освещенности в изображении светящейся линии или функция рассеяния линии (ФРЛ). Как было показано, на основе этой функции могут быть определены другие известные характеристики качества оптического изображения, такие, как пограничная кривая, частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), фотографическая разрешающая способность и др.

ФРЛ является одномерной функцией, которая описывает распределение относительной освещенности в двумерном изображении тест - объекта типа "светящаяся линия" (по нормали к оси направления линии).

Таким образом, ФРТ и ФРЛ являются базовыми количественными характеристиками качества изображения. Точное измерение этих характеристик при достижении широкого диапазона измерений очень важно для достоверной количественной оценки качества изображения, сформированного реальными оптическими системами.

ФРЛ, получаемая путем анализа изображения освещенной щелевой диафрагмы через исследуемую оптическую систему, обладает своими преимуществами как критерий оценки качества изображения оптической системы. В схемах определения ФРЛ по сравнению со схемами измерения ФРТ получается существенный выигрыш в энергии, проходящей через систему, что облегчает выбор приемника и анализ изображения. При

исследовании оптических систем спектральной аппаратуры метод определения ФРЛ позволяет получать непосредственно аппаратную функцию прибора.

Другим преимуществом контроля по ФРЛ является отсутствие жестких требований к положению строки сканирования освещенности поперек изображения линии.

Для измерения ФРЛ обычно применяются методы построчного фотоэлектрического сканирования. В настоящее время роль сканирующей системы успешно выполняет матричная регистрирующая камера.

К сканирующей системе предъявляются следующие жесткие требования:

- 1) сохранение точности в широком диапазоне чувствительности ( $10^6$ );
- 2) ширина строки сканирования не должна превышать 0,1-0,2 диаметра дифракционного пятна, следовательно, ее ширина в обычных условиях составляет микрометры.

Помехи, создаваемые вибрацией при сканировании, в настоящее время устраняются благодаря высокой скорости построчного сканирования изображения.

Наиболее распространенным сегодня является сканирование оптического изображения тест - объекта по ряду прямолинейных строк.

Работа фотоэлектрического приемника излучения или совокупности таких приемников, составляющих приемник оптического изображения, характеризуется линейной зависимостью между числом действующих фотонов и числом возникающих электрических зарядов.

Полученная функция (рис. 1), связывающая фототок приемника с освещенностью, будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось прямолинейного участка световой характеристики фотоэлектрического приемника излучения. Эта величина для реальных фотоприемников, в режиме непрерывного сканирования с достаточной скоростью, соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую 103 .

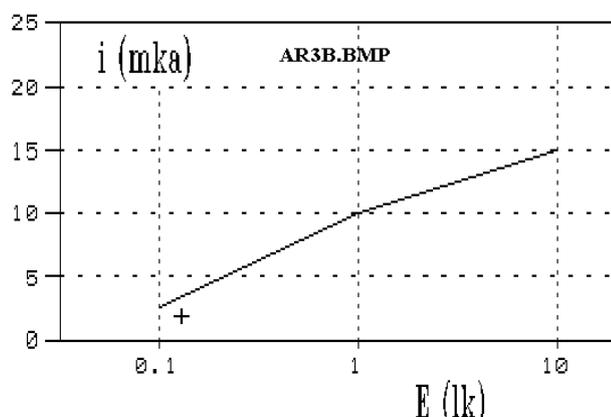


Рис.1. Плавная функция преобразования для метода фотоэлектрического сканирования (световая характеристика фотоэлектрического приемника)

Но основной недостаток метода прямого фотоэлектрического сканирования состоит в следующем. Полученная функция будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось прямолинейного участка характеристической кривой (рис.1). Эта величина для реальных фотоматериалов соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую 102.

Необходимо заметить, что знание ФРЛ в таком ограниченном диапазоне перепада освещенности не позволяет с необходимой точностью и достоверностью определить или

рассчитать такие привычные и стандартизованные характеристики качества изображения, как ЧКХ и ФКЭ.

## Метод изофотометрии ФРЛ

Указанные ограничения методов исследования ФРЛ, основанных на использовании рассмотренных выше, плавных функций преобразования, преодолеваются методами изофотометрии. В частности, разработан метод изофотометрии ФРЛ, позволяющий визуализировать график ФРЛ и измерять ее значения в диапазоне перепада интенсивности  $10^3 - 10^4$ , в том числе – и в реальном времени. Это направление основано на применении методов и средств оптических измерений третьего поколения.

Интересный способ исследования ФРЛ был описан Джонсом и Вольфом. Распределение освещенности поперек изображения щели получают в виде логарифмической кривой ФРЛ, фотографируя изображение щели через серый клин. Существо метода - в следующем. Оптическое изображение щели перекрывается клином, плотность в котором изменяется вдоль клина

$$D_k = K \cdot X$$

где  $D_k$  - оптическая плотность;  $X$  - протяженность вдоль клина;  $K$  - постоянная клина.

Результирующее двумерное распределение относительной освещенности характеризуется в поперечном сечении функцией рассеяния линии, а в поперечном направлении - функцией модуляции освещенности клином

$$-\lg E = K \cdot X$$

Изофота такого распределения дает график ФРЛ с логарифмической шкалой освещенностей.

Фотографический изофотометрический метод определения ФРЛ нашел применение при исследованиях фотографических объективов и объективов любительской киноаппаратуры. Телевизионный метод изофотометрического анализа ФРЛ позволяет визуально оценивать качество изображения по форме графика функции, непрерывно наблюдать и измерять характеристики качества изображения при вотировках, фокусировках и других перестройках систем и, кроме того, расширить диапазон измеряемых освещенностей в ФРЛ до значений, достаточных для надежных оценок качества системы. Установка для испытания объективов собрана на базе оптической скамьи. Изображение освещенной щели, построенное исследуемой системой, и увеличенное микроскопом, переносится на мишень передающей телевизионной трубки, а затем по телевизионному каналу воспроизводится на телевизионном экране с максимальным контрастом. Изофота выделяется как граница черного и белого в изображении на телевизионном экране. Градуировка осей координат полученного графика ФРЛ производится следующим образом: для определения масштаба оси относительных освещенностей необходимо знать постоянную клина и величину поперечного увеличения от плоскости клина до экрана телевизора. Масштаб по оси абсцисс определяется исходя из увеличения от плоскости изображения щели, построенного исследуемым объективом, до экрана телевизора.

Сущность способа изофотометрии ФРЛ состоит в том, что в качестве тест - объекта исследуемому объективу предъявляется объект типа "светящаяся линия переменной яркости". Для реализации такого тест - объекта в коллиматоре установлена щель, совмещенная с линейным фотометрическим клином, ось которого совпадает с расположением щели.

Построенное исследуемым объективом изображение этого тест - объекта переносится с увеличением при помощи вспомогательного микрообъектива на чувствительную площадку передающей телевизионной камеры, включенной в замкнутую телевизионную систему. Видеосистема работает в режиме выделения контура при

постоянных световых характеристиках приемника изображения. Для этого в ее составе (рис. 3) подключен блок выделения контура (БВК), выделяющий изофоту изображения тест - объекта типа "линия переменной яркости", сформированного исследуемой оптической системой.

Эта изофота имеет форму графика функции рассеяния линии (ФРЛ) исследуемого объектива, где по оси ординат располагаются значения логарифма относительной освещенности ( $\lg E_{\text{отн}}$ ), а по оси абсцисс - пространственная протяженность в плоскости изображения.

Так как график ФРЛ [ $\lg E_{\text{отн}} = f(y')$ ] формируется на экране телевизионного монитора в реальном масштабе времени, данная установка позволяет оперативно определять плоскость наилучшей установки (фокусировки) объектива, осуществлять его юстировку до достижения наилучшего качества изображения и оценивать качество изображения по ширине ФРЛ и соответствующему значению фотографической разрешающей способности (ФРС).

Компьютерной обработкой данных получают весь комплекс требуемых характеристик качества изображения объектива: оптическую передаточную функцию ОПФ и модуляционную передаточную функцию ФПМ (называемую также частотно-контрастной характеристикой ЧКХ). Определяют требуемые критерии качества изображения исследуемой системы, такие как значение коэффициента передачи контраста на заданной критической частоте.

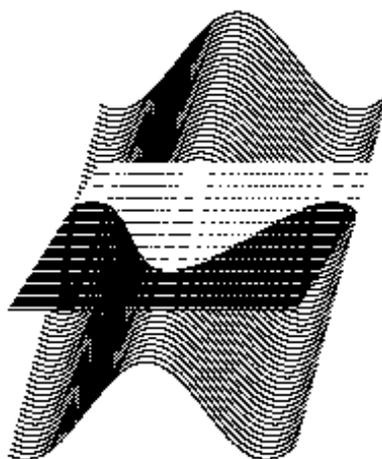


Рис. 2. Компьютерное моделирование принципа формирования изофоты как графика ФРЛ исследуемой оптической системы

Другой критерий - среднее значение ФПМ на сюжетно важном интервале частот, определяемое по формуле:

$$J = \frac{1}{\mu_{np}} \int_0^{\mu_{np}} T(\mu) d\mu$$

где  $\mu_{np}$  - частота, принятая в качестве предельной на сюжетно важном интервале;

$T(\mu)$  - коэффициент передачи контраста.

Практика контроля серийных объективов показала, что метод телевизионной изофотометрии ФРЛ позволяет надежно оценивать изменение качества изображения при появлении комы в любом из рассмотренных объективов. При исследовании комы щель в фокальной плоскости коллиматора ориентируется в направлении, перпендикулярном направлению вектора комы.

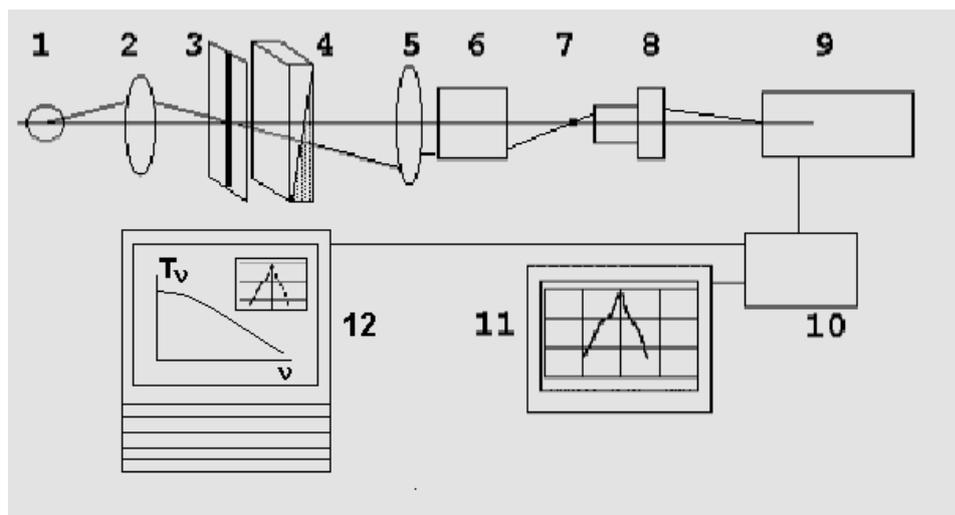


Рис.3. Схема установки для изофотометрического измерения ФРЛ объектива

- 1 - лампа, 2 - конденсор, 3 - щелевая диафрагма,
- 4 - линейный фотометрический клин, 5 - объектив коллиматора,
- 6 - исследуемый объектив, 7 - изображение тест – объекта ,
- 8 - микрообъектив, 9 -передающая телекамера,
- 10 - блок выделения контура,
- 11 - видеоконтрольное устройство (телевизионный монитор),
- 12 - компьютер с видеоадаптером

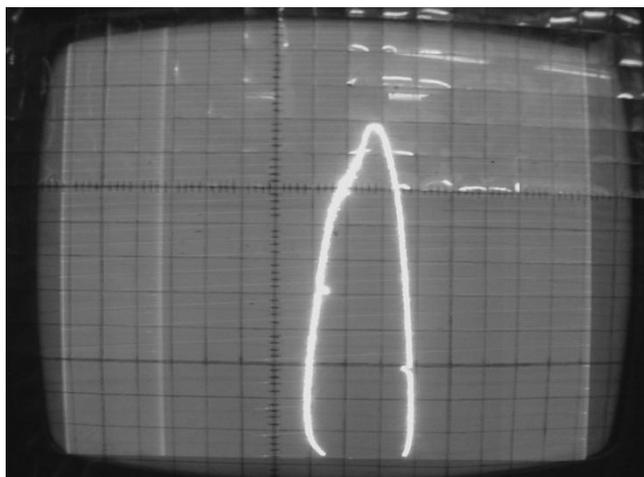


Рис.4. График ФРЛ на TV - экране

### Компьютеризация изофотометрии ФРЛ

Дальнейшее развитие указанного метода выполнено средствами компьютерных технологий. Таким образом, полученные результаты можно считать шагом в развитии новой ветви компьютерной оптики в рамках направления, получившего название “Современные оптические измерения”.

Автоматизация расчета и проектирования систем получила свое развитие с появлением электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в 40-х годах нашего столетия. В наши дни применение компьютеров получает все более широкое распространение, в том числе и в условиях действующего оптического производства, несмотря на ряд нерешенных проблем и несбывшихся надежд, связанных с попытками полностью автоматизировать труд создателя оптической системы. Наряду с вопросами

автоматизации проектирования, выполняются и задачи расчетной оценки качества изображения оптических систем.

При разработке оптических систем с форсированными оптическими характеристиками, качество изображения которых в основном обусловлено явлением дифракции, одним из важнейших вопросов становится оценка возможности реализации разработанной системы в условиях производства (обычно серийного). Использование компьютера в процессе проектирования дает возможность не только минимизировать расчетные аберрации, но и достоверно оценить влияние ошибок изготовления на результирующие характеристики изготовленной системы. Таким образом, оценивается чувствительность проектируемой системы к ошибкам технологического процесса, т.е. технологичность оптической конструкции. Рассматривая применение компьютера в области оптического производственного контроля и измерений, необходимо указать следующие основные направления (как развивавшиеся, так и требующие своего развития).

1. На этапе проектирования оптической системы:

- оценка качества изображения системы, получаемая в соответствии с расчетом;
- определение требований к точности изготовления оптических поверхностей системы, ее волновым аберрациям и, в соответствии с этим, требований к точности оптических измерений и чувствительности контроля в процессе изготовления системы;
- расчет анаберрационных схем оптического контроля, технологических корректоров аберраций и технологических контрольных оптических деталей и систем, коллиматоров и т.д.;
- расчет оптических схем приборов контроля, требуемых для производства спроектированной системы и ее деталей в соответствии с расчетом;
- расчет контрольно-юстировочных и измерительных приборов и приспособлений;
- разработка алгоритмов и программ автоматизации контроля при изготовлении, сборке и юстировке.

2. На этапе изготовления оптической системы:

- автоматизация операций контроля деталей (автоматизированное рабочее место контролера); роботизация контролера,
- автоматизация расшифровки результатов контроля (в том числе - оптико-измерительных изображений) и их регистрации, в том числе - скоростная цифровая память кадра для устранения влияния вибраций на надежность контроля;
- программно управляемая расшифровка (например, гартманнограмм); управляемое следящее сканирование (например, при расшифровке интерференционных и изофотометрических изображений);
- математическая обработка результатов измерений, получение характеристик и критериев качества изображения и параметров изделий, указаний по продолжению операции обработки изделий;
- обработка оптико-измерительных изображений и отображение результатов обработки с целью повышения наглядности, повышения производительности, чувствительности и надежности контроля;
- генерация команд управления технологическим оборудованием в системах активного контроля ГПС;
- обработка данных и получение рекомендаций на юстировочные воздействия в операциях автоматизированной юстировки ;
- контроль и аттестация готовых оптических систем и приборов.

Согласно рассмотренным концепциям, В.К.Кирилловским были предложены алгоритмы и разработано программное обеспечение, позволяющее реализовать компьютерную интерпретацию метода изофотометрии ФРЛ на созданной установке (рис. 5).



Рис. 5 Общий вид установки для компьютерной изофотометрии ФРЛ

Сформированное телевизионной камерой изофотометра изображение тест - объекта "светящаяся линия переменной яркости" вводится в компьютер при помощи телевизионного тюнера с опцией захвата кадра. Изображение, записанное в BMP-файл, далее вызывается программой "LSF\_MTF", которая подвергает его оконтуриванию, причем формируется график ФРЛ как функции  $\lg E_{\text{отн}} = f(y')$ , после чего программа подвергает график оцифровке, определяя координаты его точек, причем формируется таблица массивов значений функции. Далее программой выполняется расчет спектра пространственных частот ФРЛ как функция передачи модуляции (МПФ или ЧКХ) исследуемой оптической системы (рис.5).

### Методика компьютерной обработки данных изофотометрии ФРЛ

Сформированное на изофотометре изображение тест - объекта "светящаяся линия переменной яркости" отобразить на компьютерном дисплее при помощи компьютерного телевизионного блока. При помощи правой кнопки мыши вызвать падающее меню, в нем выбрать опцию Full Screen (полный экран). Правая кнопка - падающее меню - "copy image" (захват изображения в буфер).

При помощи правой кнопки мыши вызвать падающее меню, в нем выбрать опцию Full Screen (полный экран). Правая кнопка - падающее меню - "copy image" (захват изображения в буфер).

Свернуть все окна, с рабочего стола вызвать PAINT, в нем, через опцию "paste" вызвать изображение тест - объекта; взять его в рамку, устранив лишние поля и посторонние блики в изображении.

Дальнейший алгоритм: "Правка - копировать - файл - создать - вставить - файл - сохранить как - ИМЯФАЙЛА".

Так создается файл изображения для последующей обработки в программе FRL\_MTF.

Выключить TV - тюнер.

Запустить программу LSF\_MTF.exe. .

Далее: "Открыть - ИМЯФАЙЛА - Image - Контур - ФРЛ - МПФ (ЧКХ)".

### Порядок команд программы:

**Контур** - изображение тест-объекта преобразуется в график ФРЛ в осях  $\lg I_{отн} = F(y')$ , где  $I_{отн}$  - относительная освещенность,  $y'$  - пространственная координата, поперечная направлению щели.

Одновременно программа подвергает этот график цифровой расшифровке (табуляции). Таблица функции  $\lg I_{отн} = F(y')$  выводится в соседнем окне.

**ФРЛ** - график  $\lg I_{отн} = F(y')$  преобразуется в график  $I_{отн} = F(y')$ .

Таблица новой функции  $\lg I_{отн} = F(y')$  выводится в соседнем окне.

**МПФ(ЧКХ)** - Функция  $\lg I_{отн} = F(y')$  подвергается математической обработке, в результате которой рассчитывается функция передачи модуляции МПФ (традиционно она называется частотно - контрастной характеристикой ЧКХ) для исследуемой оптической системы.

Общий вид установки для компьютерной изофотометрии ФРЛ телевизионной камеры показан на рис. 5 и 6.

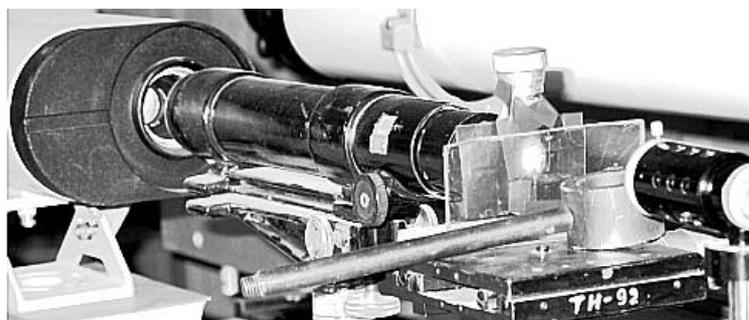
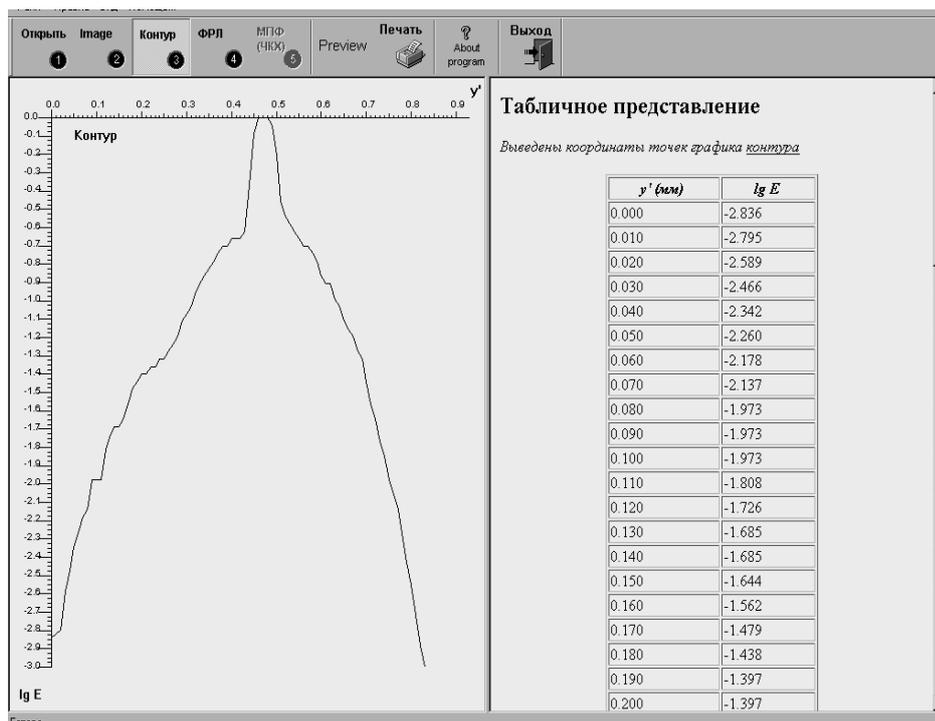


Рис. 6 Установка для компьютерной изофотометрии ФРЛ телевизионной камеры

На рис. 7 показаны результаты обработки данных изофотометрии ФРЛ TV-камеры и расчета ЧКХ системы объектив - видикон.



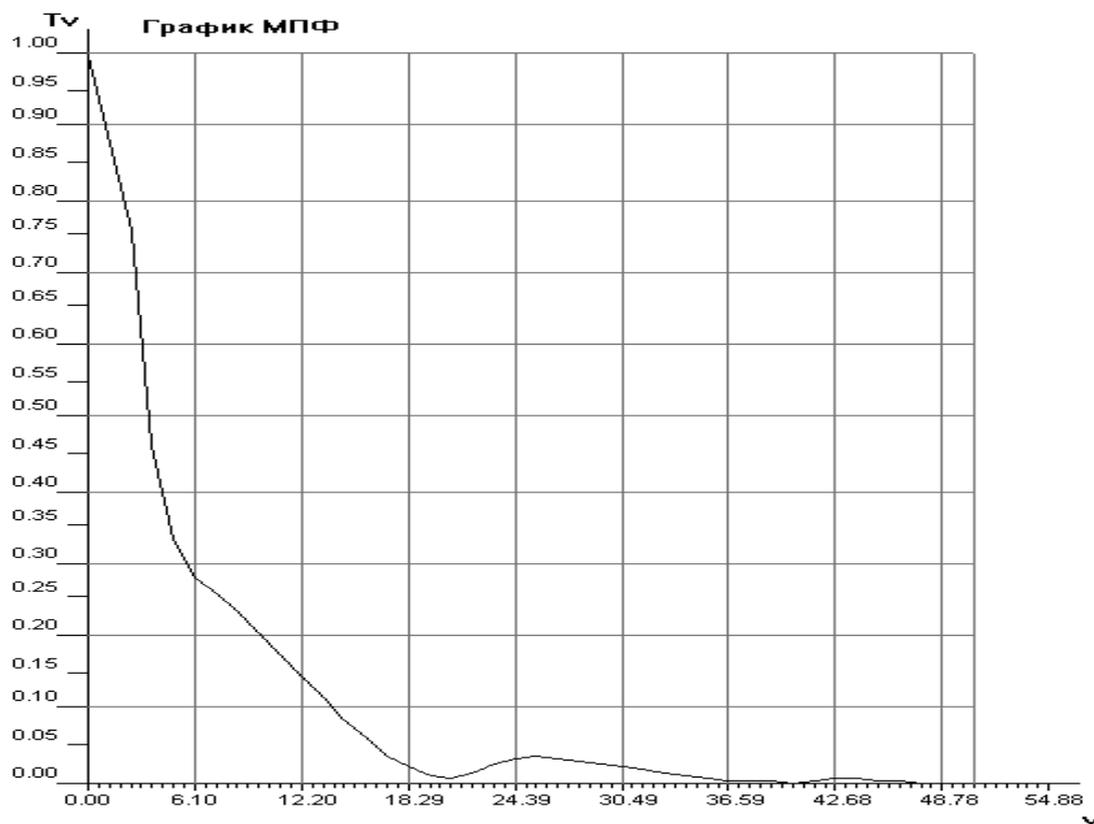


Рис. 7. Компьютерная обработка данных изофотометрии ФРЛ.

### Контрольные вопросы по теоретической части

Что является первичным критерием качества изображения оптической системы наряду с ФРТ?

Что представляет собой ФРЛ?

Назовите базовые количественные характеристики качества изображения

Назовите преимущества контроля по ФРЛ.

Какие требования предъявляются к сканирующей системе?

Какой вид сканирования оптического изображения тест – объекта является наиболее распространенным

Укажите основной недостаток метода прямого фотоэлектрического сканирования.

Какой результат измерения позволяет получить метод изофотометрии ФРЛ.

Укажите возможности телевизионного метода изофотометрического анализа ФРЛ.

Какой вопрос считается самым важным при разработке оптических систем с форсированными оптическими характеристиками.

Укажите основные направления развития, возникающие на этапе проектирования

Укажите основные направления развития, возникающие на этапе изготовления.

# Лабораторная работа

## Задание для работы

1. Отъюстировать схему изофотометра ФРЛ с контролируемым объективом И-50.
2. Выполнить качественное исследование по виду ФРЛ (по изображению на телеэкране) в сопоставлении со вторым объективом (Гелиос - 44).
3. Измерить ширину ФРЛ на заданном уровне относительной освещенности  $E_{OTN}$ .
4. Получить значения фотографической разрешающей способности ФРС из таблицы соответствия ФРЛ и ФРС.

## Схема установки

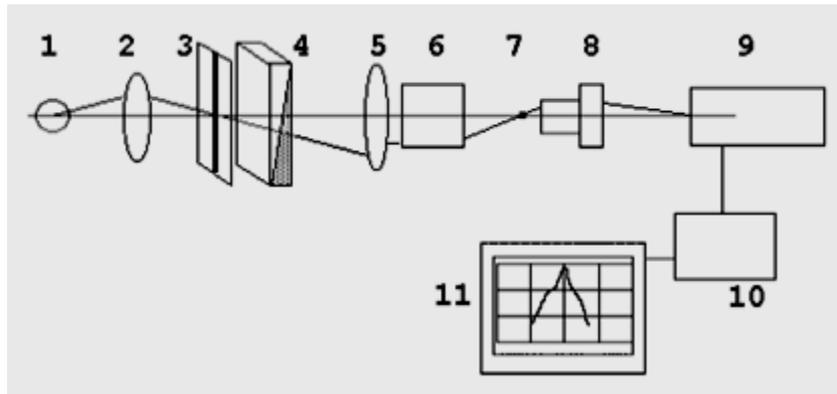


Рис. 8. Схема интерферометра

- 1 - лампа,
- 2 - конденсор,
- 3 - щелевая диафрагма,
- 4 - линейный фотометрический клин,
- 5 - объектив коллиматора,
- 6 - исследуемый объектив,
- 7 - изображение тест - объекта,
- 8 - вспомогательный микрообъектив,
- 9 – приемник изображения передающей телекамеры
- 10 - блок выделения контура,
- 11 - видеоконтрольное устройство (телевизионный монитор).

## Технические характеристики установки

1. Источник света - лампа накаливания СЦ - 80.
2. Ширина щели - 0,050 мм.
3. Фокусное расстояние коллиматора - 1500 мм .
4. Диаметр объектива коллиматора - 160 мм.
5. Микрообъектив - 40x0,65 .
6. Фотоокуляр - 15<sup>x</sup>.
7. Увеличение в телевизионном канале - 22<sup>x</sup>.
8. Передняя апертура проецирующего микрообъектива должна быть согласована с задней апертурой исследуемого объектива.

## Проведение измерений

1. Измерить (по экранной сетке) на телевизионном экране расстояние  $h$  от вершины графика ФРЛ до уровня  $E_p$ .
2. Измерить (ширину ФРЛ на уровне  $E_p$ ). Перевести  $L_H$  в  $L$ , пользуясь выражением:

$$L = \frac{L_H}{V_s},$$

(Значения величин - см. раздел «Измерение ширины ФРЛ»).

3. Перевести значение  $L$  в величину  $Z$  по формуле:

$$Z = \frac{\pi \cdot L \cdot u'}{\lambda}$$

где  $u'$  - апертура фотообъектива,

$$\lambda = 0,55 \text{ мкм.}$$

4. По таблице ФРЛ - ФРС (или по калибровочной кривой в осях  $R_\phi = f(Z)$ , где  $R_\phi$  - ФРЛ) найти значение ФРС исследуемого объектива  $R_\phi$ .
5. Расфокусировать и снова настроить плоскость наилучшей установки для исследуемого объектива. Повторить измерение  $h$  и  $L_H$  и определение  $Z$  и ФРС.
6. Исследовать аналогично второй образец объектива.

## Отчет

В отчете должны быть представлены:

- схема установки
- краткое описание метода
- таблица измерений.

Калибровочная таблица изофотометра (ФРЛ - ФРС).

Z	ФРС
1	114
2	92
3	80
4	70
5	64
6	58
7	53
8	47
9	41
10	35

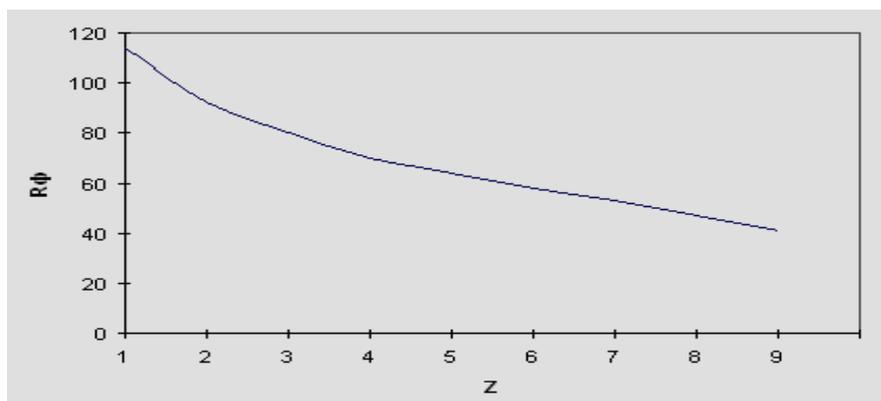


Рис. 9. Калибровочная кривая изофотометра ФРЛ

Значение ФРС может быть также определено по формуле:

$$R_{\phi} = 10 \cdot (2.15 - 0.21712 \cdot \ln(Z))$$

### ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ФРЛ

Расстояние по высоте графика ФРЛ от вершины на TV - экране - 10 мм.

$E_{отн}$  на этом уровне ФРЛ - 0,25.

Увеличение  $V_S$  - от изображения щели до TV - экрана -946 ,

( $V_m$  - увеличение, создаваемое микрообъективом установки,

$V_{TV}$  - увеличение в TV - канале.

$$V_S = V_m \cdot V_{TV} .$$

Ширина ФРЛ:

$$L = L_H \cdot V_S ,$$

где  $L_H$  - ширина, измеренная по TV - экрану.

### **Контрольные вопросы по лабораторной работе**

Поясните, в чем состоит сущность способа изофотометрии.

Укажите, что используется в качестве тест-объекта в данном методе.

Что происходит с пятном рассеяния исследуемого объектива при проекции его на матрицу?

Поясните, для чего используется блок выделения контура.

По какой формуле можно найти значение ФРС?

Как определить увеличение в TV-канале (Указать обе формулы)

Назовите основные узлы в схеме установки.

Укажите, микрообъектив с какой апертурой используется в схеме установки?

Укажите, какой источник света используется в лабораторной работе.

Назовите, чему равен диаметр точечной диафрагмы.

## **Литература**

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. Изд-во СПб ГУ ИТМО. 2006.
2. Кирилловский В.К. Контроль качества объективов. Учебное пособие. ЛИТМО. Л. 1984.
3. Кирилловский В.К. Применение телевидения при контроле и аттестации оптических систем. Учебное пособие. ЛИТМО.Л.1983.

# ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ МИКРООБЪЕКТИВОВ НА ЛАЗЕРНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С ДИФРАГИРОВАННЫМ ЭТАЛОННЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

## Теоретический материал

### Принцип метода

Принцип интерферометра состоит в том, что на одну из поверхностей светоделиителя, выполненного в виде тонкой плоско - параллельной пластинки толщиной 0,17 мм (покровное стекло) нанесено зеркальное покрытие.

В центре зеркального покрытия имеется точечное отверстие, а между лазером и светоделиителем пучка расположен объектив, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием. Оно служит источником дифрагированного фронта, который является опорным. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения идеальной сферической волны, возникающей на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности или прошедшей дважды через исследуемый объектив в автоколлимационной схеме.

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

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

Тест-объект "светящаяся точка"<sup>4</sup> 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 измерения которого пришлось бы выполнять операцию замены пластинки и повторной настройки схемы), но и от положения изображения точечного тест - объекта (пятна рассеяния) относительно точечной диафрагмы. Кроме того, смещение пятна относительно диафрагмы более чем на половину диаметра пятна приводит к гашению опорного пучка лучей в интерферометре, что влечет за собой исчезновение интерференции.

Итак, достоинствами рассмотренной классической схемы являются:

1. Отсутствие образцовой оптической поверхности, а, следовательно, и ошибок ее изготовления.
2. Простота - интерферометр, по существу, состоит из точечного тест-объекта и пластины с точечной диафрагмой в полупрозрачном покрытии.

Недостатками схемы Линника, на наш взгляд, являются следующие положения:

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

## **Интерферометры с дифракцией на точечном отверстии для контроля ошибок формы прецизионных поверхностей**

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 вибросочувствительности, 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  $\lambda$  - длина волны оптического излучения. Таким образом, для контроля при их изготовлении и применении необходимы приборы, обеспечивающие точность на уровне  $1/100 - 1/200\lambda$ , то есть на порядок точнее традиционных.

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

## Интерферометр Линника

Альтернативным направлением интерферометрии стало создание интерферометров, в которых опорный сферический волновой фронт создается путем дифракции пучка излучения, сфокусированного на точечной диафрагме, соизмеримой по диаметру с длиной волны. Первая известная схема такого рода была предложена академиком Линником (рис. 1).

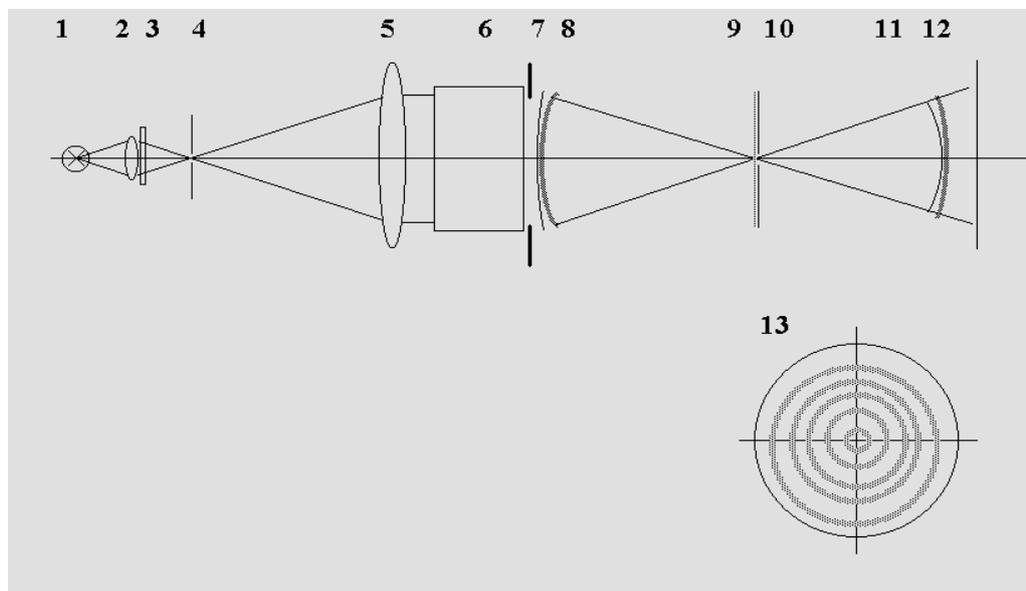


Рис. 1. Схема Линника

- 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

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

## Неравноплечий дифракционный интерферометр

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и *разнесенными* ветвями (рис. 2, 3).

Разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Этот прибор имеет традиционную методику настройки и интерпретации интерференционной картины, обеспечивает высокое качество интерферограммы, гибкость при исследовании оптических систем и элементов с

различными коэффициентами пропускания (отражения) от 98% (зеркальные покрытия) до 0.15 % (просветляющие покрытия).

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

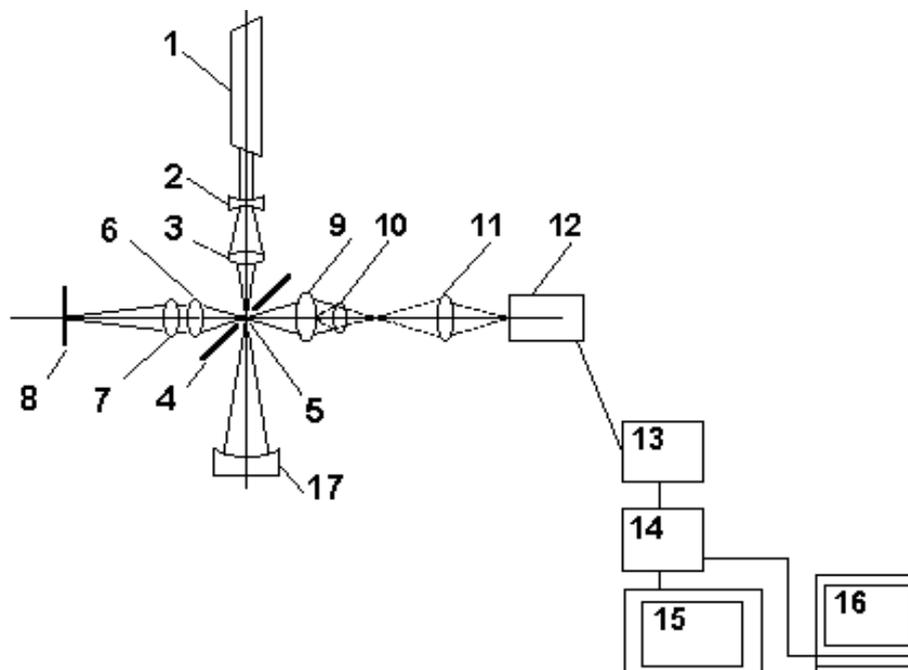


Рис. 2. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом.

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

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. 3).

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

На одну из поверхностей светоделиателя светового пучка, выполненного в виде плоскопараллельной пластины 4, нанесено зеркальное покрытие (вместо светоделительного покрытия, используемого в неравноплечих интерферометрах). В центре зеркального покрытия имеется точечное отверстие 5, диаметр которого соизмерим с длиной волны излучения. Между лазером и светоделителем пучка расположен объектив 2 - 3, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием 5 на светоделителе пучка.

Точечное отверстие служит источником дифракционной волны, которая является опорной. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть

результат сложения идеальной сферической волны, возникающей при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности.

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

В плече наблюдения имеются объектив 9 и окуляр 11 для наблюдения освещенной точечной 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 пятна рассеяния (обычно- дифракционного кружка) диаметром порядка 10 мкм. Точечное отверстие становится источником дифракционной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности фокусируется в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие, а чаще – смещенного относительно него для получения интерференционной картины прямолинейных полос.

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

При этом на отверстии формируется вторая дифракционная сферическая волна, фронт которой используется в качестве опорного. В результате сложения этой волны с рабочей, сформированной контролируемой поверхностью, возникает интерференционная картина 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 (12,13,14).

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

Имеется модификация данного интерферометра, позволяющая просто и эффективно реализовать режим фазового считывания интерферограммы, при котором точность отсчета может достигать 0.001 длины волны.

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

## **Относительно формы и структуры дифрагированного волнового фронта**

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

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

Описание взаимосвязи сформированного в плоскости апертуры зонда распределения поля с дальнепольной интенсивностью не зависит от параметров объекта, на котором произошла дифракция. Это обстоятельство используется в данной работе для обоснования возможности наклона плоскости диафрагмы с точечным отверстием на угол 45 градусов без внесения искажений в дифрагированный волновой фронт.

Рассмотрим отверстие в тонком металлическом экране. В плоскости экрана с его тыльной стороны формируется рассеянное поле, источником которого является, во-первых, падающее на экран с фронтальной стороны излучение, а, во-вторых, наводимые токи, которые, в свою очередь, также создают переменное электромагнитное поле. В результате в среде в непосредственной близости к экрану возникает электромагнитное поле с пространственной структурой мельче длины волны падающего света. Это поле образует основную часть так называемого ближнего поля, состоящего из неоднородных плоских волн, которые быстро затухают в перпендикулярном к экрану направлении [1].

Энергия дальнего поля распространяется соответственно, в дальнюю зону дифракции (на расстоянии более  $1000\lambda$ ), 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 гауссовском законе распределения, не достигающем нулевого значения в пределах телесного угла  $\pm 90^\circ$ .

На рис. 3 – 4 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. 4а направлен вертикально.

Как следует из рисунков, неоднородность интенсивности, являющаяся следствием неоднородности дифрагированного поля по амплитуде, достаточно велика и зависит как от направления поляризации света, так и от параметров стенок экрана, моделируемых

проводимостью. Общий характер распределения дальнеполевой интенсивности все время остается близким к гауссовой кривой.

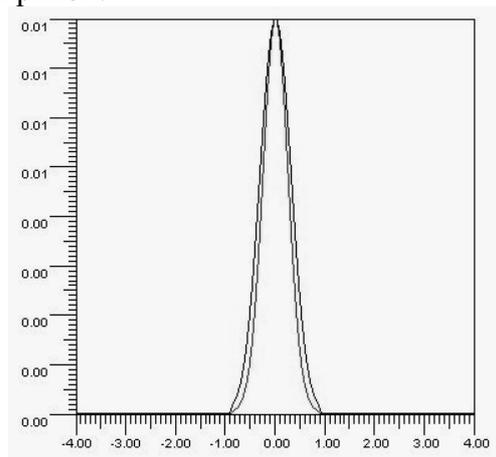


Рис. 3 Дальнеполюное распределение интенсивности света, дифрагированного на отверстии диаметром 140 нм.

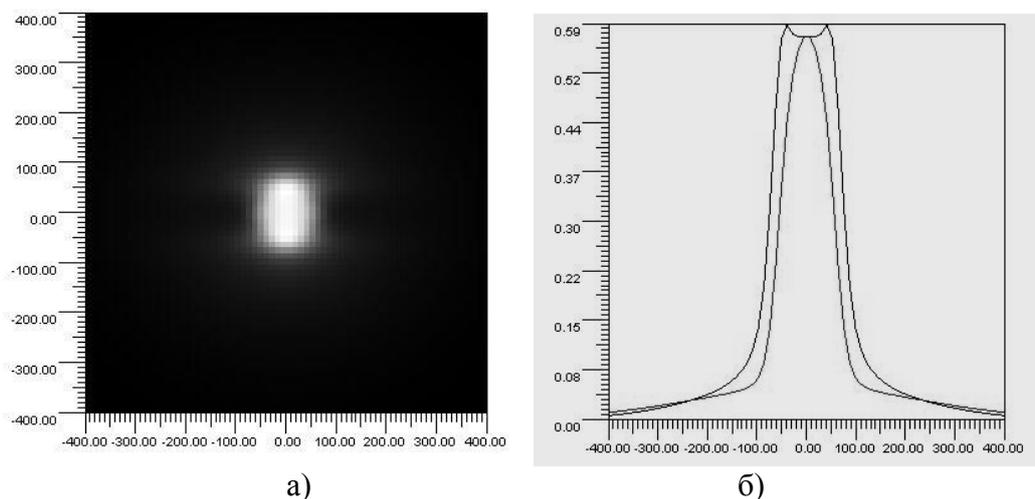


Рис. 4. Распределение интенсивности в ближнем поле:  
а) полутонная картина,  
б) поперечное сечение в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

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

В отличие от неравномерности амплитуды, которая является следствием неравномерности индикатриссы излучения вторичного источника, формирующегося в области отверстия, погрешность волнового фронта, образованного дифракцией на малом отверстии, весьма мала, так как эталонный волновой фронт – это поверхность постоянной фазы излучения, используемого уже в дальней зоне дифракции. Эта поверхность является почти идеально сферической, причем отклонение волнового фронта от сферы в зависимости от расстояния определяется по формуле, полученной с учетом теории Дебая

[1] на основании выводов работ и справедливой на таких расстояниях от экрана, которые не менее, чем на три порядка превышают размер отверстия:

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

где  $d$  – диаметр диафрагмы,  $\lambda$  – 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, равна 0.00004 ( $\lambda$ ). Соотношение (1) не содержит угол, под которым наблюдается отверстие, поскольку эта формула, естественно, справедлива в полном угле нулевого порядка дифракции. Для указанного случая этот угол, определяемый формулой:

$$\sin \theta = \lambda / d ,$$

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  $\pm 18$  градусов имеем высококачественный сферический волновой фронт, числовая апертура которого равна  $NA = 0.31$ . Следует заметить, что вблизи угловых краев нулевого порядка дифракции фаза поля быстро меняется на 180 градусов, поэтому уверенное использование дифрагированного волнового фронта возможно в пределах  $\pm 40\%$  от нулевого порядка, что, впрочем, является чисто технологическим вопросом.

Влияние угла наклона плоскости диафрагмы должно сказываться в эллиптичности углового распределения интенсивности из-за сужения проекции контура отверстия на плоскость, перпендикулярную оси дифрагированного пучка. Такой эффект должен находиться в полном согласии с теорией дифракции Фраунгофера, которая фактически описывает поле в дальней зоне дифракции. Этот эффект стабильно наблюдается при настройке интерферометра и показан на рис. 5.

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

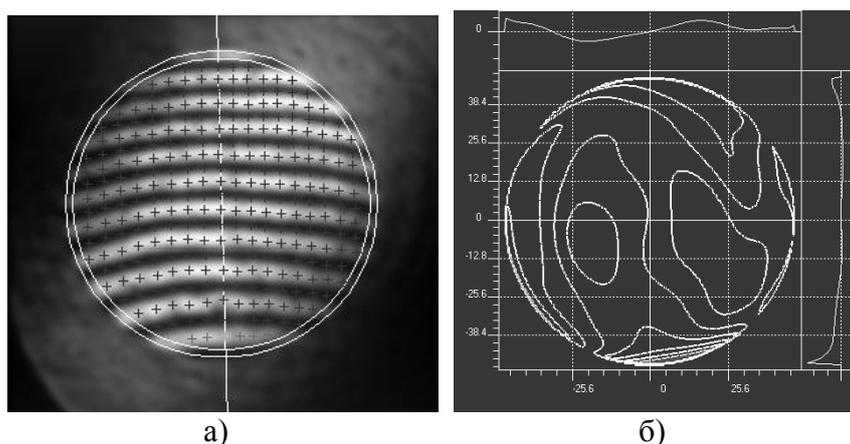


Рис. 5. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б).

Из полученных результатов следует, что, по крайней мере, с хорошей производственной точностью эталонный волновой фронт является поверхностью, форма которой не зависит ни от ракурса наблюдения, ни от изменения угла наклона плоскости

диафрагмы, ни от положения детали в пределах 80%-ного угла от нулевого порядка дифракции.

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

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

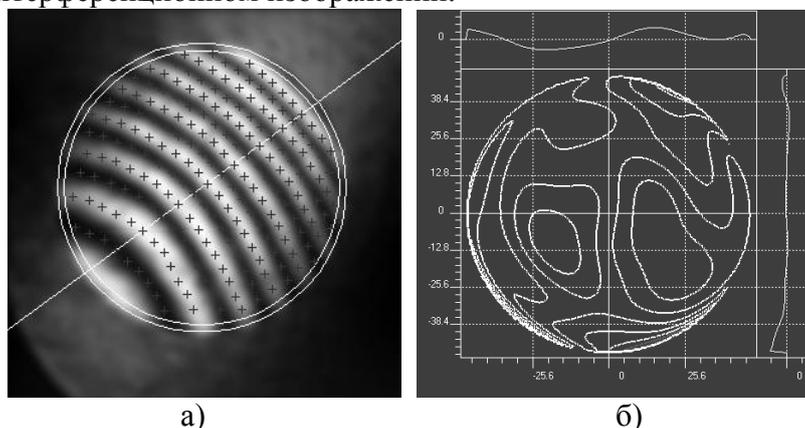


Рис. 6. Обработка интерферограммы (а) и карта профиля поверхности (б).

## Конструктивное решение интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом

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

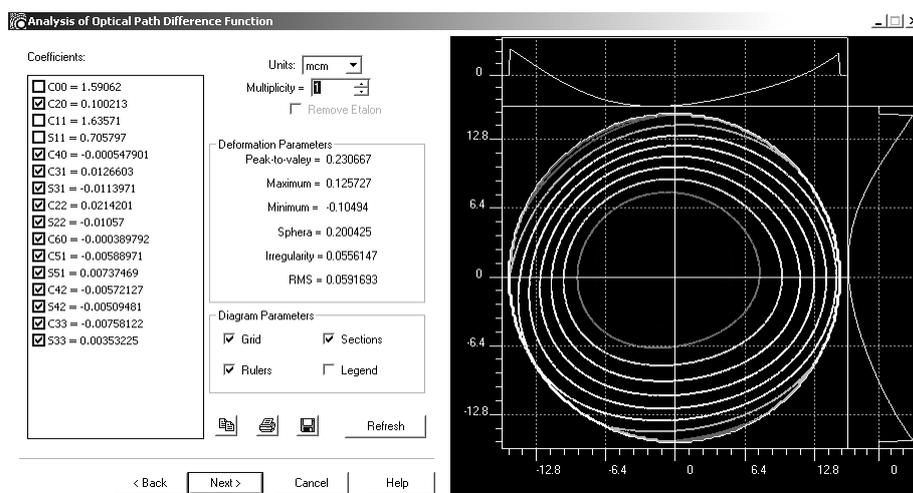


Рис. 7. Карта и профили деформаций волнового фронта по данным традиционной интерферометрии

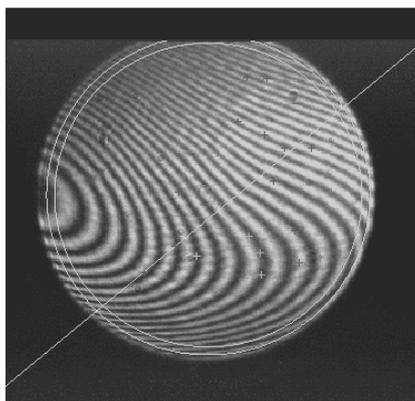


Рис. 8. Сложная интерферограмма как модель для отладки нового поколения программного обеспечения расшифровки

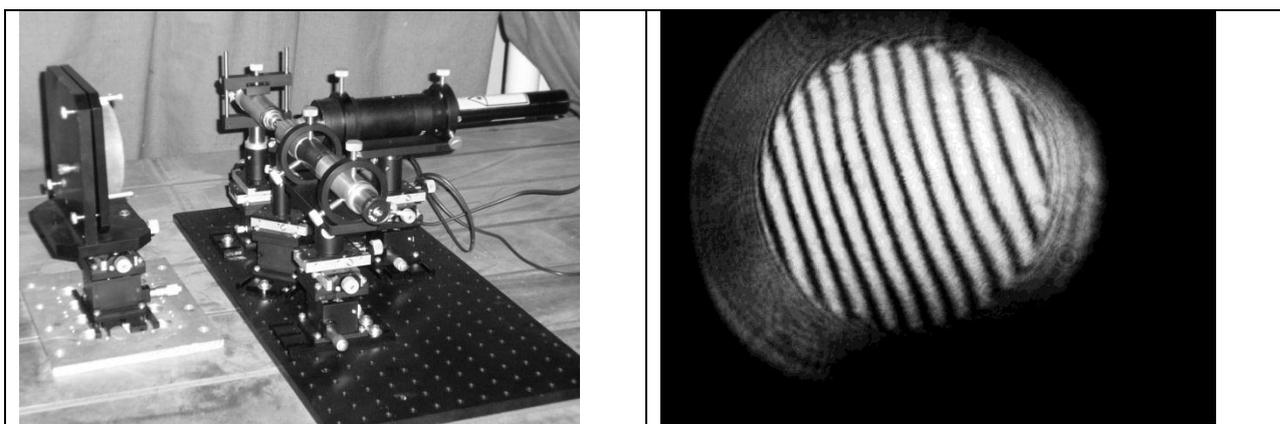


Рис. 9. Установка исследования прецизионного сферического зеркала на основе PDI-интерферометра на виброизолирующем интерференционном столе

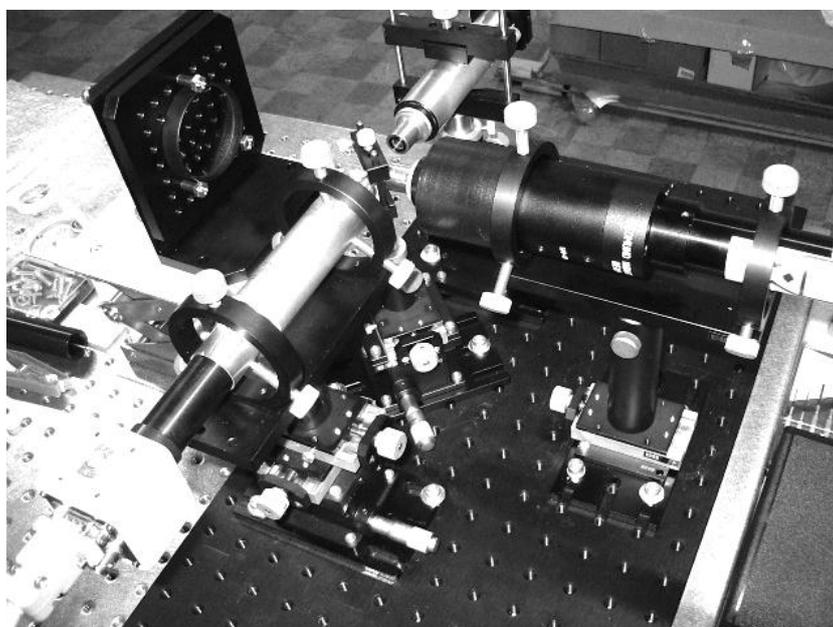


Рис. 10. Общий вид экспериментального PDI-интерферометра, построенного на базе серийных узлов производства фирм Meller-Wedel и ЛОМО

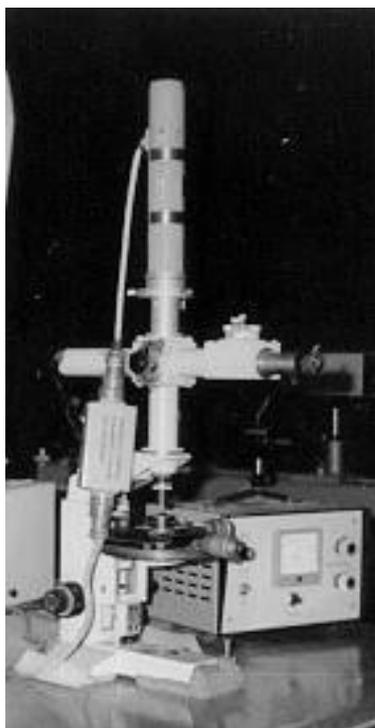


Рис. 11. Дифракционный интерферометр для исследования объективов микроскопов

В настоящее время происходит бум в области исследований и разработок в направлении дифракционной интерферометрии. Это выражается в явном увеличении числа публикаций в зарубежных изданиях, расширении числа исследователей, связавших себя с развитием данной тематики. Ведущие зарубежные фирмы изучают, заимствуют и даже патентуют созданные нами решения.

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

На рис. 9, 10, 11 показаны образцы различных конструктивных решений дифракционного интерферометра, созданные в разные годы и для различных целей. В их числе – интерферометр для исследования прецизионной оптики микроскопов, применение которого обеспечило создание нового комплекта объективов для современных микроскопов (выпускаемых ныне в России и в Китае). На макете рассмотренного интерферометра проводились исследования опытных образцов микрообъективов ОА-6,3 Л, ОПХ-10 Л, ОПХ--25 Л, ОПХ-40 Л, ОПХ-100 Л и ОА-63 ЛБ, которыми комплектуются опытные образцы люминесцентных микроскопов ЛЮМАМ. Эта работа продемонстрировала широкие возможности прибора, в частности его способность контролировать микрообъективы с большим диапазоном увеличения при минимальном времени перенастройки.

На рис. 9 и 10 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.

Более совершенная конструкция (рис 12), 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.

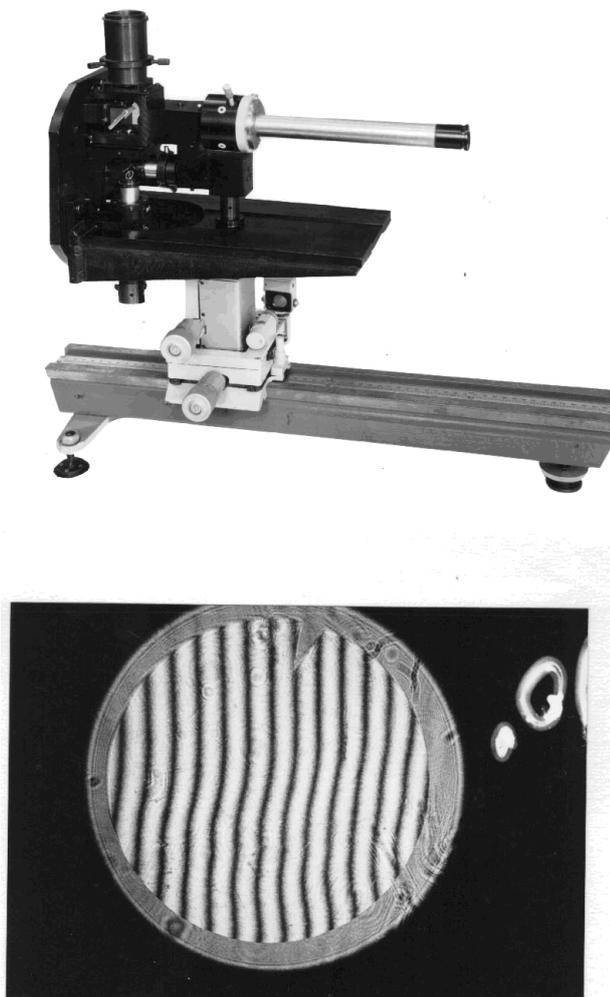


Рис.12. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом. Обращает на себя внимание высокое качество интерферограммы

Таблица 1.

### Технические данные

Предельная погрешность	инструментальная	$\lambda/100.$
Апертура проверяемых поверхностей		не более 0.25
Числовая апертура объективов	осветительных	0.2
Числовая апертура наблюдательной системы	объектива	0.3
Пределы перемещения интерференционной головки по 3-м осям, мм		$\pm 10$

Приемник изображения	фотокамера «Зенит – Е» и цифровая фотокамера
Источник света	Лазер ЛГ – 52 – 1
Длина волны излучения, мкм	0.6328
Габариты, мм	735×400×590
Масса, кг	16

## **Унифицированный интерферометр для контроля точной астрооптики**

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

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

### *Назначение*

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

## Устройство и работа интерферометра

### *Принцип действия и оптическая схема*

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

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

Интерферометр работает следующим образом,

Пучок лучей источника 1, прошедший через расширительный элемент, фокусируется на точечном отверстии в зеркальном покрытии наклонного плоского зеркала 5 в виде пятна рассеяния диаметром около 4 мкм. Точечное отверстие становится источником дифрагированной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой поверхности 6 изображается в виде пятна рассеяния,

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

Основание 1 интерферометра имеет 3 ножки с регулировкой по высоте.

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

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

Механическая конструкция интерферометра обеспечивает максимальную жесткость для предотвращения влияния вибраций.

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

Автоколлимационный осветитель 6 отъюстирован соосно с осветительной системой 7,

**Примечание.** В зависимости от того, какая контролируется поверхность (алюминированная, без покрытий или просветленная) производится замена узла автоколлимационного осветительного зеркала 25 на узел с непросветленной или просветленной плоскими пластинками, входящими в комплекс интерферометра. При этом (при необходимости), наблюдая в окуляр 16, следует подправить освещение винтами 26 и (или) фокусирующей автоколлимацион.осв.объектива с помощью рукоятки 27.

Наблюдательная система 8 отъюстирована соосно с автоколлимационным осветителем.

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

Зеркало 10 выполнено 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, разрабатываемой на ЛОМО. Этот комплекс осуществляет первичную обработку оптического изображения (интерферограммы) и преобразует его в цифровой массив данных, удобный для дальнейшего ввода его в ЭВМ с целью получения на выходе числовых абберрационных характеристик исследуемой оптической системы, а также выработки другой необходимой информации, например управляющих команд для последующего этапа обработки оптической поверхности или сборки и юстировки всей оптической системы или ее составных частей.

### Порядок установки и подготовка к работе

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

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

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

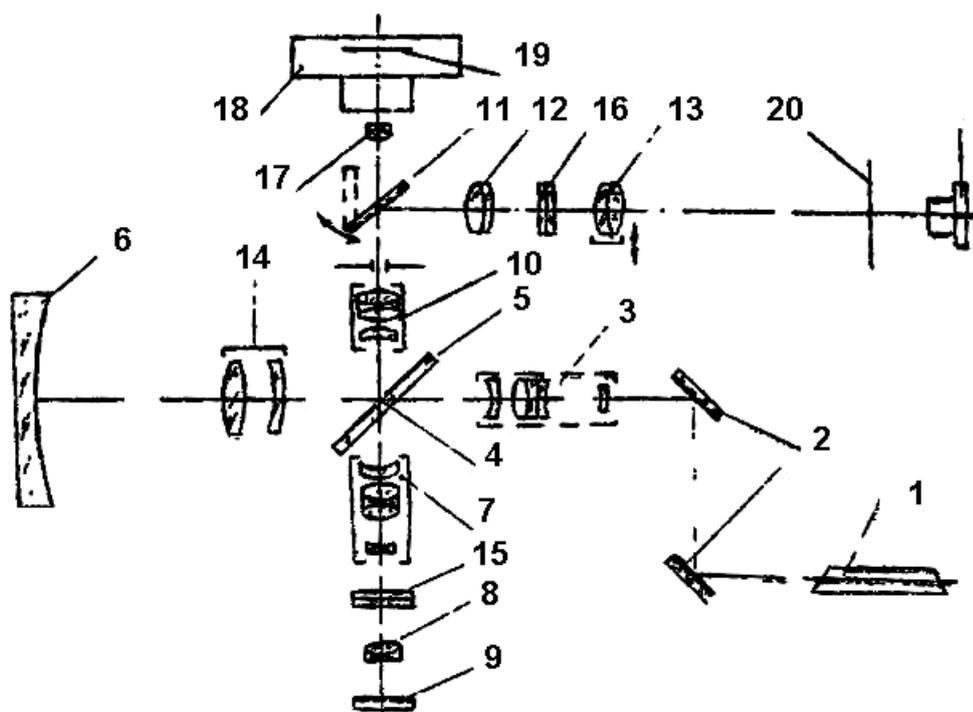


Рис. 13. Схема безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом - ПК-881

### Методика работы на интерферометре

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

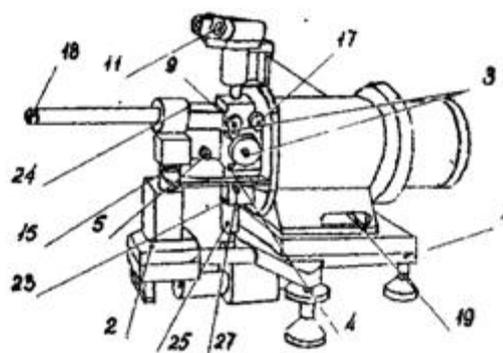


Рис. 14

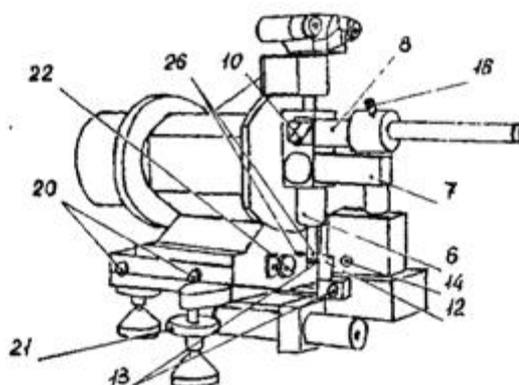


Рис. 14. Конструктивное решение безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом - ПК-881

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

Освободить стопор 19.

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

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

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

Разворотами поляризаторов 23 и 24 добиться максимального контраста.

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

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

При наблюдении интерференционных колец число последних меняют винтом 22.

Фотографирование интерференционных картин выполняется по следующей методике.

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

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

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

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

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

Закрыть затвор фотоаппарата. Интерферометр готов к последующей работе.

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

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

После обработки негативы подвергаются фотографическому оконтуриванию.

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

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

#### *Методика оконтуривания интерферограмм.*

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

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

3. После высушивания отпечаток аналогичном способом отпечатать на куске пленки ФГ-СК.

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

После обработки получается оконтуренный негатив интерферограммы.

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

6. Оконтуренный отпечаток подвергается расшифровке на соответствующем измерительном приборе.

### Методика метрологической аттестации интерферометра ПК-881-00.000

Этапы аттестации.

Аттестация прибора включает следующие операции:

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

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

Допускается прямое измерение диаметра пучка, спроецированного на матовый экран.

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

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

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

где  $u'$  - расчетная апертура объектива.

г) найти диаметр точечной диафрагмы по формуле:

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

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

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

Примечание:

Допускается определение размера точечной диафрагмы измерением с помощью микроскопа.

### Аттестация интерферометра

Осуществляется путем фотографирования ряда интерферограмм вогнутого, имеющего местную ошибку пробного стекла, при его поворотах относительно оптической оси интерферометра через  $22.5^\circ$  (5 положений от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ) и через  $90^\circ$  (от  $90^\circ$  до  $180^\circ$ ).

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 aberrации ПК-381 осуществляется контролем того же пробного стекла на неравноплечем интерферометре в сравнении результатов. Сферические aberrации 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.

### **История создания безэталонного неравноплечевого лазерного интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом**

Историю создания и развития данного интерферометра удобно проследить, пользуясь приведенным списком литературы.

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

1. Авторское Свидетельство изобретение "Лазерный интерферометр" . Королев Н.В., Кирилловский В.К., Головкин П.В., Иванова Т.А., Рагузин Р.М. N 655188,1978.
2. Методы контроля оптики микроскопов. (Аналитический обзор N 2450. ЦНИИ Информации, М.1980.
3. Кирилловский В.К. Применение лазеров при контроле оптики в условиях производства. Материалы 6 научно- технической конференции 26-28.11.80. "Использование лазеров в современной науке и технике", ЛДНТП, Л. 1980.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение .Л.1984. 265 с.
5. Кирилловский В.К. "Опыт применения интерферометрии для контроля микрооптики." Наглядное пособие. ЛДНТП, Л.1982. 10с.
6. Иванова Т.А. Кирилловский В.К., "Исследование и контроль объективов микроскопов" Учебное пособие . ЛИТМО .1983
7. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Контроль и аттестация оптических систем с применением источников когерентного излучения. ( Аналитический обзор N 3585). ЦНИИ информации, М.1985.
8. Петрученко И.Р., Удалов В.В., Валов Н.И., Иванова Т.А.. Лазерный интерферометр для контроля оптических поверхностей " Авт.свидет. на изобретение. N1380393. 1985
9. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. "Контроль оптических систем с применением лазеров" Учебное пособие. Л. ЛИТМО.1987.

10. Кирилловский В.К., Артамонов Д.Д. . Приборы и оборудование для контроля изделий оптического производства. Оптические приборы и товары народного потребления. Приложение к журналу ОМП N3, 1990
11. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. "Дифракционные интерферометры". Л. ЛИТМО.1990.
12. V.K.Kirillovsky. Diffraction Reference Wavefront Laser Interferometer. SPIE-The International Society for Optical Engineering.Proceed. "Miniature and Microoptics:Fabrication and System Applications II.20. Jul.1992,SanDiego, Calif,Volume 5 , 1751,p.p.197-200.
13. Кирилловский В.К., Анализ и синтез методов и средств контроля дифракционно ограниченными оптическими системами с качеством изображения . печат. Автореферат докторской диссертации; 1998 г.33с.
14. Кирилловский В.К., Кузнецов Д.Н.. Оптимизация лазерного интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом на основе использования лазерных пучков гауссовой структуры. Сборник "Международная конференция. "Прикладная оптика-98", ГОИ-ИТМО СПб,16-18 декабря 1998.
15. Кирилловский В.К., Кузнецов Д.Н. , Трухин М.М. Интерферометр с дифрагированным фронтом сравнения для контроля прецизионных оптических поверхностей. Международная конференция "Прикладная оптика 98", ГОИ,ИТМО,СПб,16-18 декабря 1998.
16. Кирилловский В.К. Лазерный интерферометр с дифрагированным опорным фронтом. Российская научно - практическая конференция ОПТИКА - ФПЦ "ИНТЕГРАЦИЯ". - XXX научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава ИТМО(ТУ). Санкт-Петербург, 25-27 января 1999 года.
17. Кирилловский В.К., Лазерный интерферометр с дифрагированным опорным фронтом. Российская научно - практическая конференция ОПТИКА - ФПЦ "ИНТЕГРАЦИЯ". - XXX научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава ИТМО(ТУ). Санкт-Петербург, 25-27 января 1999 года.
18. В.К.Кирилловский. Модифицированный лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом. Статья. Конференция ППС, СПб ГИТМО ТУ, 2000 г.
19. Кирилловский В.К.. Вознесенский Н.Б., Высокоапертурный дифракционный интерферометр с унифицированным опорным фронтом. Статья. Международный оптический конгресс "Оптика-XXI век" 16-20 октября 2000 г.Санкт-Петербург.
20. В.К.Кирилловский. Изучение принципов современной прецизионной интерферометрии на примере дифракционных интерферометров. Статья. Международный оптический конгресс "Оптика-XXI век", 16-20 октября 2000 г.Санкт-Петербург.
21. Kyeong-Hee Lee, N.B.Voznesensky, V.K.Kirillovsky. Principle of certification of high precision optical parts and systems based on diffraction interferometer. Proceedings of The First Scientific Workshop-Presentation "Optical Micro- and Nanotechnologies (OmaN-1)". 17-18 June 2002, St.-Petersburg, RUSSIA.
22. Кирилловский В.К., Гвоздев С.С., Маларев В.А. Принципы контроля ошибок формы полированных поверхностей. Оптические методы исследования стереометрии и внутренних дефектов элементной базы микроэлектроники. Сборник научных трудов ученых ИТМО. СПб. ИТМО. 2002г.
23. Гвоздев С.С., Особенности оптической диагностики характеристик поверхностей микросборок. (Статья). В Сборнике научных статей. "Оптические методы исследования дефектов и дефектообразования элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники , СПб. ГИТМО (ТУ). 2002г.
24. Кирилловский В.К., Вознесенский Н.Б.. Ли Кенг Хи Оптический измерительный комплекс на базе лазерного дифракционного интерферометра. XXXII научная и

учебно методическая конференция посвященная 300- летию Санкт- Петербурга, 4 - 7 февраля 2003, СПб

25. V.K.Kirillovsky, N.B.Voznesensky, M.M.Trouchine. The inter-ferometer with diffraction on dot aperture for testing of the shape errors of precise surfaces. The Third International Symposium "Intensive Laser Actions and Technological Application" (Plata-III), SPIE (USA), IFMO (Russia), KERI(Korea), June 29 - July 3, St.Petersburg-Pushkin, 2003.

## Интерферометр с голографической рассеивающей пластинкой

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

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

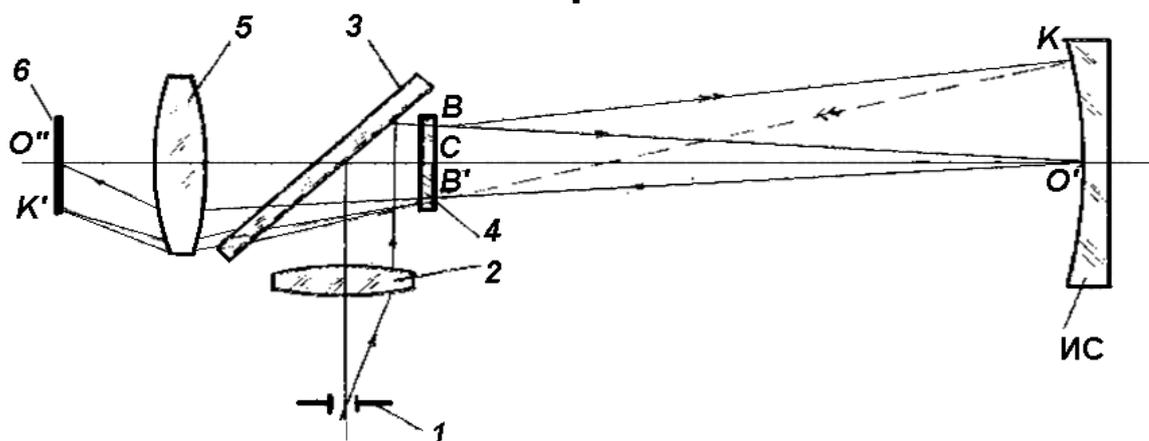


Рис. 15. Интерферометр с рассеивающей пластинкой

Развитие голографической техники позволяет создавать интерферометры, свободные от указанных недостатков. Одним из таких приборов является интерферометр с рассеивающей пластинкой (рис. 15). Свет от точечного источника 1 фокусируется объективом 2 на поверхность исследуемого зеркала, предварительно пройдя через светоделительное зеркало 3 и рассеивающую пластинку 4, которая представляет собой специфический голографический рассеиватель, обладающий круговой симметрией структуры. Техника изготовления такого рассеивателя несложна и рассмотрена в литературе [10]. Принцип работы прибора следующий. Пусть в точку К пришел один из лучей, рассеянных пластинкой. Отраженные в точках О' и К лучи приходят в точку В' на рассеивателе, симметричную точке В первичного рассеивания. Здесь происходит вторичное рассеивание, причем рассеянная составляющая луча из точки О' накладывается на нерассеянную составляющую луча из точки К'. Лучи интерферируют между собой. Интерференционная картина, изображаемая объективом 5 в плоскости приемника 6, отражает отклонения формы исследуемой поверхности от сферы. Свет, не претерпевший

рассеяния после двух проходов 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 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,  $\varphi$  — апертурный угол,  $\lambda$  — длина волны.

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

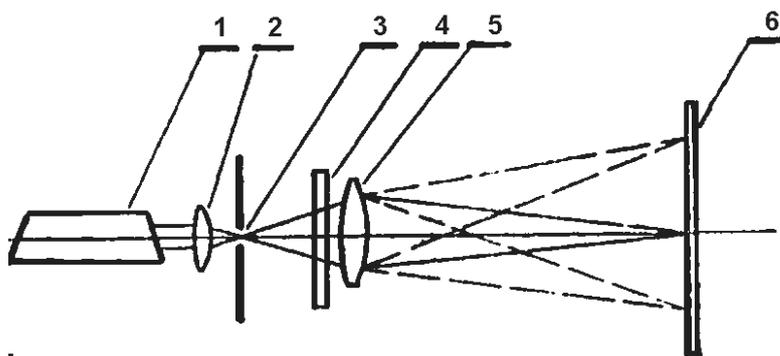


Рис. 16. Установка для изготовления голографической рассеивающей пластинки

Методика изготовления рассеивателя состоит в двукратном экспонировании пластины в плоскости сложного интерференционного изображения, возникающего при прохождении расширенного лазерного пучка через матовое стекло. Схема установки<sup>1</sup>, собранной в ЛОМО для изготовления рассеивающих пластин, приведена на рис. 2. Луч газового лазера 7, расширенный объективом 2, в виде расходящегося пучка направляется в зрачок объектива 5 через диафрагму 3 и матовое стекло 4. Объектив сфокусирован в плоскость фотослоя голографической фотопластинки 6.

Пластинка экспонируется в исходном положении требуемое время, затем экспозиция прерывается и пластинка должна быть повернута вокруг оптической оси установки на  $180^\circ$ . Точность поворота обуславливает симметрию структуры голографического рассеивателя. В процессе экспонирования требуется исключить влияние вибраций на элементы схемы. В противном случае при перемещении элементов интерференционной картины по поверхности фотослоя в процессе экспонирования происходит полная либо частичная потеря структурных элементов. Это ведет к тому, что-либо интерференция с

полученным рассеивателем не может быть получена вообще, либо снижается апертура, в пределах которой наблюдается интерференция от контролируемой поверхности.

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

После фотографической обработки на пластинке получается голографическая рассеивающая структура в виде совокупности элементов почернения размерами  $1\div 10$  мкм. Для повышения светопропускания и уменьшения отражения света от поля рассеивателя в направлении приемника изображения выполняется отбеливание голограммы в растворе железосинеродистого калия. Таким образом, рассеиватель из поглощающего (амплитудного) превращается в фазовый, так как поглощающие элементы, состоявшие вначале из дисперсного металлического серебра, переводятся в частицы прозрачной соли, имеющей показатель преломления, отличный от показателя преломления желатинового носителя. Оптическая плотность поля рассеивателя, дающего после отбеливания структуру с оптимальными свойствами, составляет  $0,2\div 0,3$ . Максимальная апертура контролируемой поверхности, достигнутая с применением полученных описанным способом рассеивателей, составила  $0,15$ .

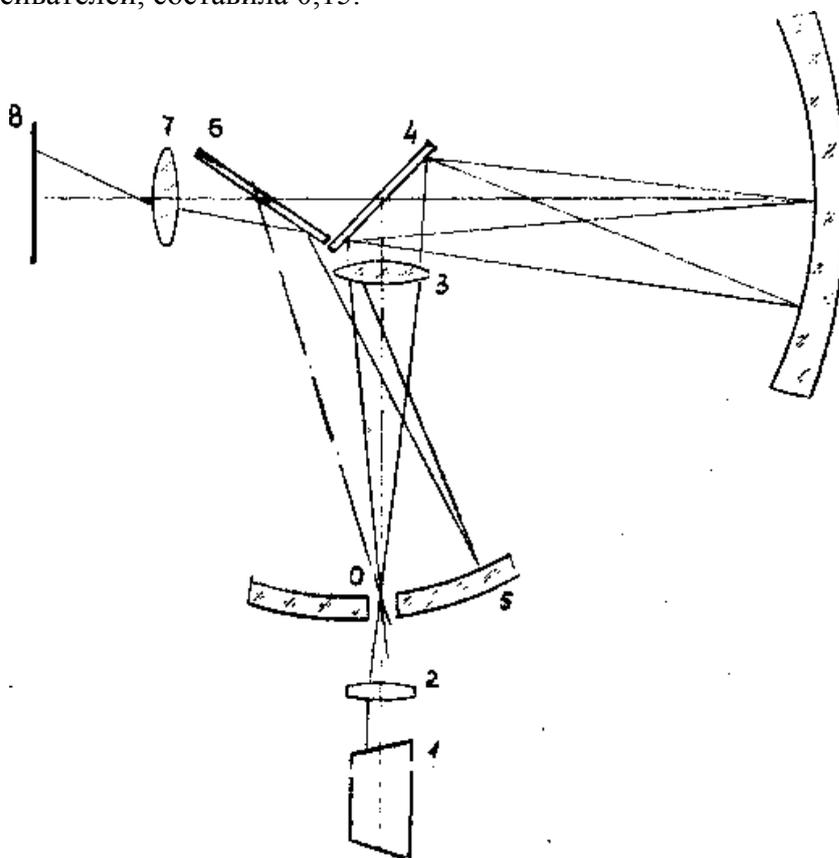


Рис.17. Модифицированная, схема интерферометра с рассеивающей пластинкой

На ЛОМО усовершенствована первоначальная схема интерферометра. В модифицированной схеме (рис. 17) луч лазера 1 фокусируется объективом 2 в точку O в отверстии зеркального коллектива 5. 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 4-кратный выигрыш в светосиле прибора. Интерферометр нашел применение при исследовании главного зеркала телескопа ЗТА диаметром 2,6 м и ряда других изделий, выпускаемых объединением. Погрешность измерения отклонений формы поверхностей не превышает  $\lambda/5 - \lambda/10$ .

Принцип изготовления голографических рассеивающих пластин состоит в двукратном экспонировании голографического фотослоя в пучке лазерного излучения через матовое стекло. После первого экспонирования фотопластинка поворачивается вокруг оптической оси пучка на угол  $180^\circ$  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, фоторезисторе и т. п.), после чего наносят отражающий алюминиевый слой путем вакуумного напыления.

### **Контрольные вопросы по теоретической части**

Укажите направление распространения света, прошедшего полупрозрачное покрытие и света, испытавшего дифракцию на точечной диафрагме в покрытии.

Укажите, что является результатом интерференции рабочего и опорного волновых фронтов

Поясните, при каких условиях можно получить хороший контраст интерферограммы

Перечислите основные преимущества и недостатки классической схемы интерферометра Линника

Назовите основные современные требования оптического производства и исследований

Перечислите основные оптические системы и элементы наивысшего класса точности

Укажите требования к точности расчета и выполнения оптических систем наивысшего класса точности

Укажите недостаток классических интерферометров при контроле оптики наивысшего класса точности

Поясните принцип работы «интерферометра с дифракцией на точке».

Назовите достоинства схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом.

Поясните роль сферического волнового фронта в интерферометре и укажите способ его получения.

Укажите, где может быть использован интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом.

Поясните, как образуется интерференционная картина в схеме интерферометра.

Поясните, возможно ли появление паразитных изображений в интерференционной картине

Что позволяет повысить точность и надежность интерференционного контроля?

Укажите, какие поверхности и элементы позволяют контролировать интерферометр с дифракционной волной.

Поясните принцип работы схемы интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом.

Для чего в схеме интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом дополнительно вводится линза Бертрана?

Какую функцию выполняет камера и блок обработки сигнала в интерферометре с дифрагированным опорным волновым фронтом.

Какую функцию выполняет точечное отверстие?

Укажите количество и роль волновых фронтов, образующихся на точечном отверстии.  
Почему интерферометр может быть назван полностью безэталонным?  
Какие способы расшифровки интерферограммы применяют при наличии вибраций?  
Назовите основное назначение интерферометра для контроля точной астрооптики.  
Назовите числовую апертуру осветительных объективов унифицированного интерферометра для контроля точной астрооптики.  
Что позволяет предотвратить влияние вибраций в интерферометре?  
Назовите 2 основных этапа метрологической аттестации интерферометра  
Назовите основные недостатки неравноплечего интерферометра и способ (-бы) их устранения.  
Укажите, что является основной частью интерферометров с рассеивающей пластинкой.  
Как определяются требования к разрешению голографических пластинок?  
Для чего выполняется отбеливание голограммы в растворе железосинеродистого калия?  
Что произойдет, если удалить светоделительный элемент из схемы интерферометра с рассеивающей пластинкой?  
В чем состоит принцип изготовления голографических рассеивающих пластин?

## Лабораторная работа

### Задание для работы

1. Настроить интерферометрическую схему контроля микрообъектива.
2. Визуально оценить ошибку по интерферограмме в долях шага полосы.
3. Дать сравнительную оценку качества и aberrаций объективов.

### Схема установки

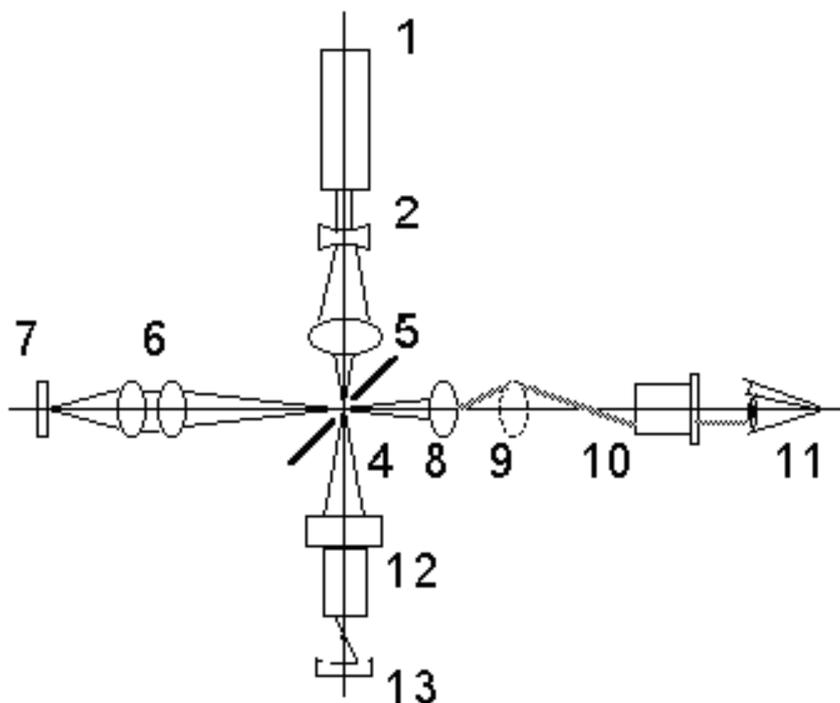


Рис.18. Схема интерферометра

- 1 - лазер
- 2 - расширительный элемент
- 3 - осветительный объектив
- 4 - точечное отверстие
- 5 - светоделитель с зеркальным покрытием
- 6 - коллиматорные объективы
- 7 - плоское зеркало
- 8 - объектив наблюдательной системы
- 9 - вводимая линза Бертрона
- 10 - трубка МИР-4
- 11 - глаз наблюдателя
- 12 - исследуемый объектив
- 13 - алюминированная полусфера.

### Технические характеристики установки

1. Штатив (на базе микроскопа "ПОЛАМ").
2. Источник света: - гелий - неоновый лазер.
3. Наблюдательная система (с трубкой МИР - 4 и линзой Бертрона).

4. Диаметр точечной диафрагмы - 2 мкм.

### Проведение измерений

Получить интерферограммы поочередно от двух микрообъективов.

Для этого при выключенной линзе Бертрана сначала ищут автоколлимационные блики с помощью подвижки столика интерферометра вдоль оптической оси.

После фокусировки блика включают линзу Бертрана и наблюдают интерференционную картину. Число интерференционных полос и их ориентацию можно менять с помощью подвижек столика поперек оптической оси.

По виду интерференционной картины определить величину деформации волнового фронта исследуемого микрообъектива как отношение максимальной стрелки прогиба  $l$  интерференционной полосы к шагу  $h$  полосы.

$$\Delta N = \frac{l}{h}$$

Повторить исследования при различных направлениях интерференционных полос. Результаты занести в таблицу исследований.

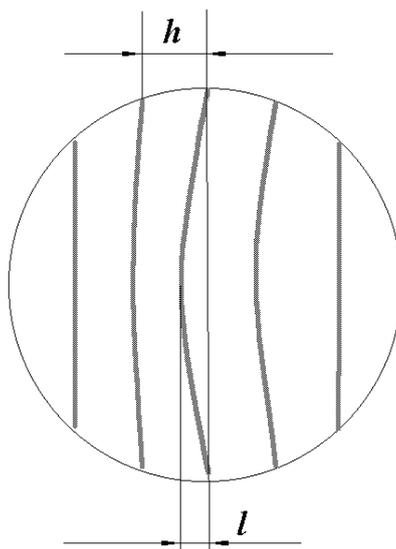


Рис. 19 . Методика определения величины деформации волнового фронта исследуемого микрообъектива

### Отчет

В отчете должны быть представлены:

- схема установки
- краткое описание метода
- таблица результатов измерений, выраженных в числе интерференционных полос, числе длин волн и в микрометрах.

## **Контрольные вопросы по лабораторной работе**

Поясните, в чем состоит принцип интерферометра

Укажите, что является источником опорного дифрагированного фронта волны?

Назовите основные узлы в схеме установки

Укажите, какой источник света используется в лабораторной работе. Уточните рабочую длину волны источника света.

Поясните, какую особенность имеет интерферометр в режиме контроля оптических поверхностей.

Какие способы применяются для устранения влияния вибраций?

Назовите, чему равен диаметр точечной диафрагмы.

Для чего в интерферометре используется выключенная линза Бертрана?

Для чего в интерферометре используется включенная линза Бертрана?

Поясните, как можно изменить ориентацию полос интерференционной картины и их число.

Как определяется величина деформации волнового фронта исследуемого микрообъектива?

## **Литература**

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. Изд-во СПб ГУ ИТМО. 2006.
2. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. ЛИТМО. 1989.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.:Машиностроение.1983.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОШИБОК ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА ЛАЗЕРНОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФИЗО

## Теоретический материал

### Принцип метода

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

### Контроль плоской поверхности

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

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

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

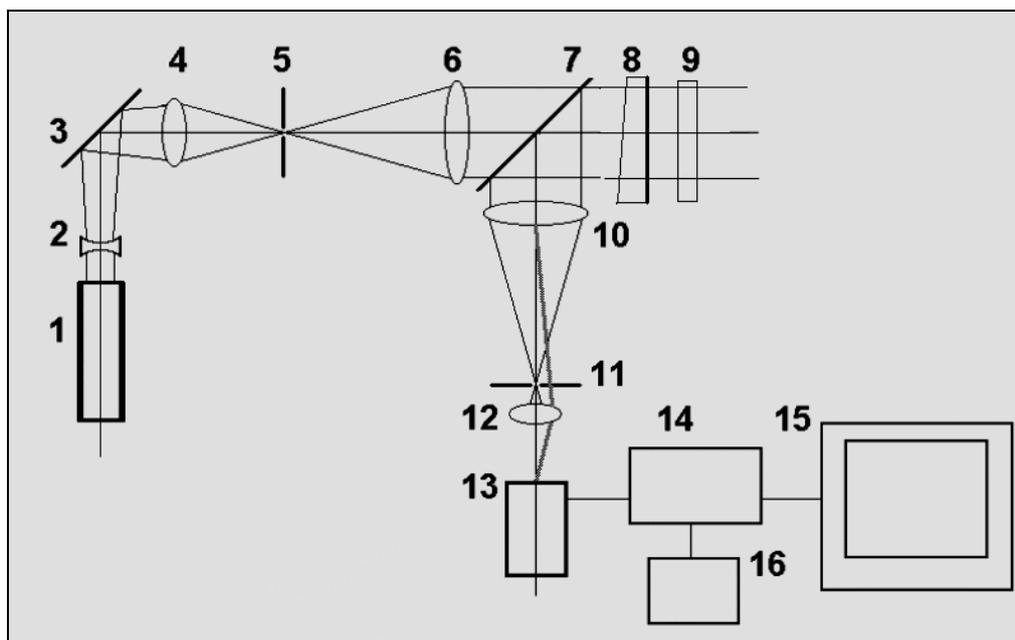


Рис.1. Схема интерферометра Физо при контроле плоской оптической поверхности

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

### Контроль сферической поверхности

Интерферометр Физо для контроля сферической оптической поверхности 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.

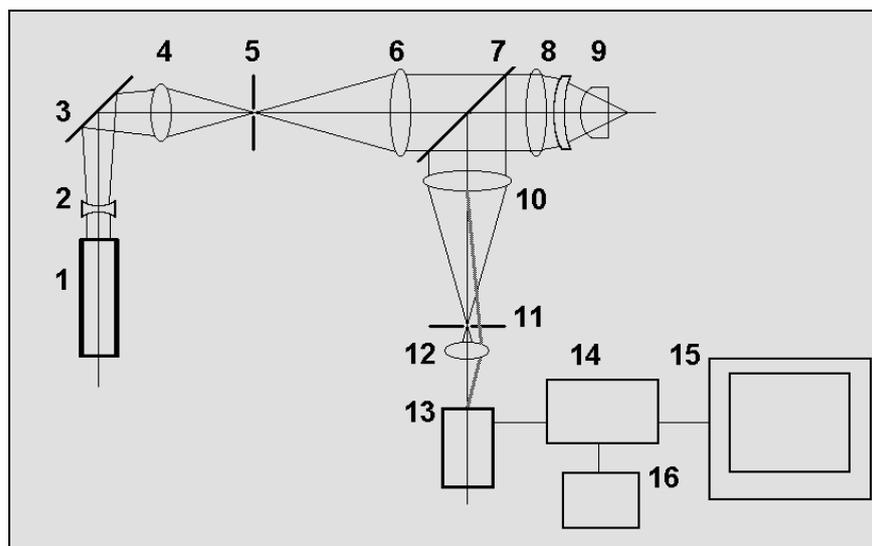


Рис. 2. Схема интерферометра Физо при контроле сферической оптической поверхности

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



Рис.3. Контроль линзы на интерферометре Физо



Рис. 4. Общий вид интерферометра Физо в агрегате с анализатором интерферограмм ТАИ-1 при контроле линзы

### Контроль объективов на интерферометре Физо

На рис. 5 показаны схема для контроля объектива на интерферометре Физо, общий вид установки и ее элементов.

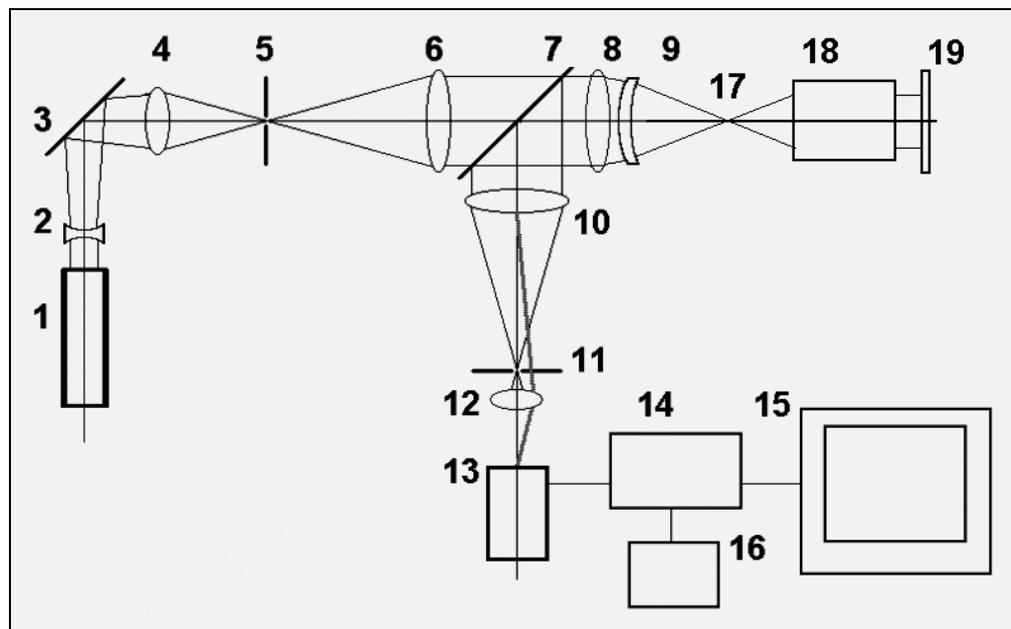


Рис.5. Схема интерферометра Физо при контроле объектива

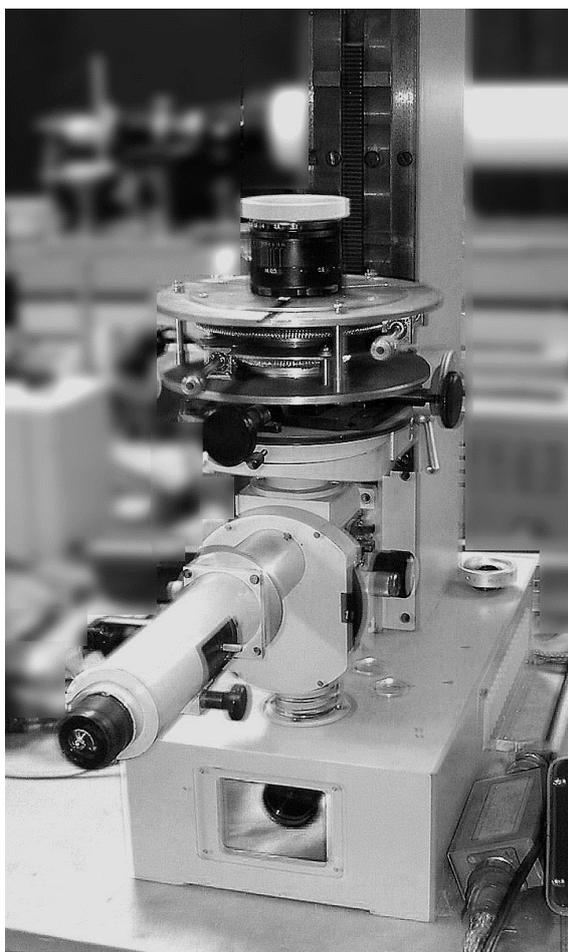


Рис. 6. Общий вид интерферометра Физо при контроле объектива



Рис.7. Контроль объектива Гелиос-44 на интерферометре Физо

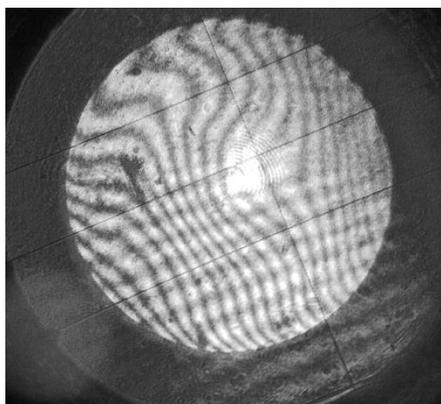


Рис.8. Интерферограмма объектива Гелиос-44

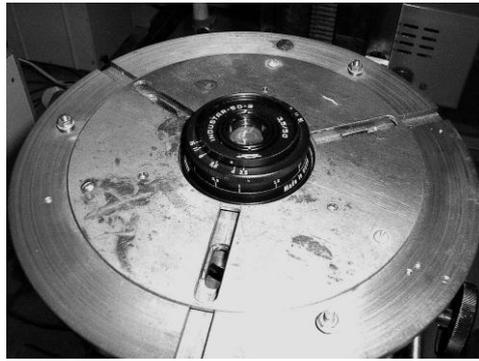


Рис. 9. Объектив Индустар-50 на интерферометре Физо

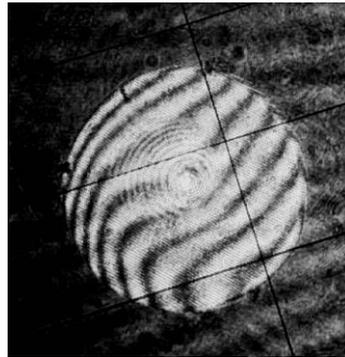


Рис. 10. Интерферограмма объектива Индустар-50

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

В табл.1 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  $\lambda/20$ .

### **Контрольные вопросы по теоретической части**

Что послужило началом поиска новых схемных решений интерферометров?

Поясните, благодаря чему стало возможным совмещение рабочего плеча и опорного плеча в интерферометре Физо.

Укажите, что используется в качестве образцовой поверхности при контроле плоской поверхности

Поясните, как учитываются погрешности образцовой поверхности в интерферометре.

Укажите, где располагается исследуемая плоская и исследуемая сферическая поверхность в схеме интерферометра Физо?

Почему нерабочая поверхность образцовой пластины выполнена с клиновидностью?

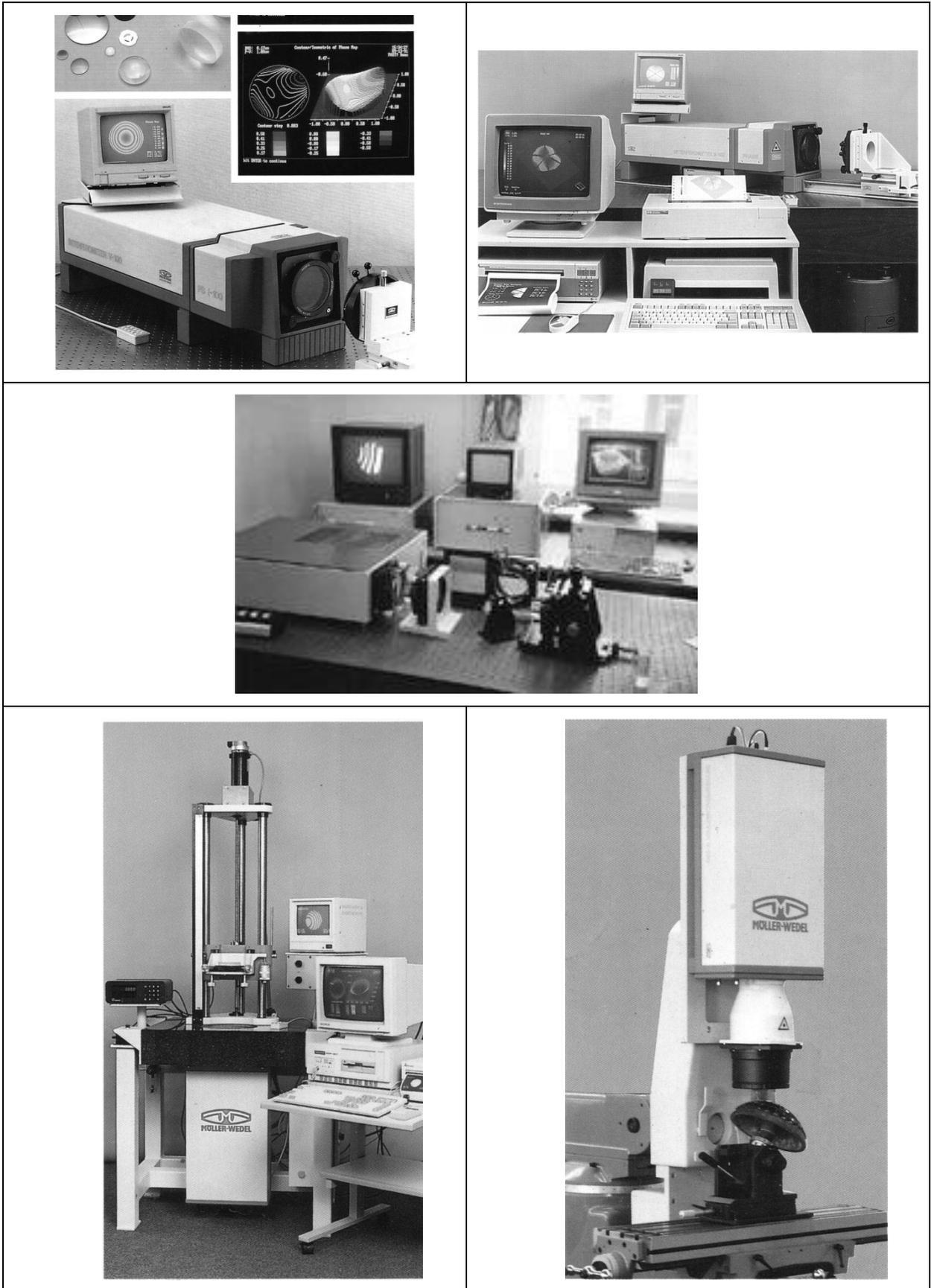
Укажите, какой порядок клиновидности наблюдается у нерабочей поверхности образцовой пластины?

Объясните, почему полосы паразитной интерференционной картины от обратной поверхности не разрешаются приемником изображения?

Укажите, частоту полос паразитной интерференционной картины.

Поясните, почему интерферометры по схеме Физо приобрели широкую популярность при контроле оптических изделий средней точности?

Таблица.1. Разновидности конструктивных решений интерферометра Физо (Фирма Möller-Wedel)



# Лабораторная работа

## Задание для работы

1. Настроить интерферометрическую схему исследования оптической поверхности линзы.
2. Визуально оценить ошибку по интерферограмме в долях шага полосы, наблюдая в окуляр.
3. Оценить ошибку поверхности по интерферограмме на телевизионном экране комплекса ТАИ в режимах выделения контуров, центров и двойных центров полос.
4. Дать сравнительную оценку качества и ошибок исследуемых оптических поверхностей.

## Технические характеристики установки

1. Интерферометр - КЮ 757 М2
2. Источник света: - гелий - неоновый лазер ОКГ - 13.  $\lambda=0.6328$  мкм
3. Электронный комплекс обработки интерферограмм - ТАИ
4. Телевизионная камера - на ПЗС - матрице
5. Коэффициент повышения точности расшифровки путем электронной трансформации интерферограммы -  $10^x$
6. Телевизионный метод устранения влияния вибраций

## Проведение измерений

Получить интерферограммы поочередно от 3-х линз.

Для этого, при выключенной линзе Бертрана, необходимо найти автоколлимационные блики, настраивая интерферометр подвижками столика интерферометра вдоль и поперек оптической оси.

После продольного и поперечного совмещения автоколлимационных бликов необходимо включить линзу Бертрана и наблюдают интерференционную картину. Число полос и их ориентацию изменяют поперечными подвижками столика по двум поперечным осям.

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

$$\Delta N = \frac{l}{h}$$

Повторить исследования при различных ориентациях исследуемой детали, для трех образцов.

Результаты занести в таблицу исследований.

## Отчет

В отчете должны быть представлены:

- схема установки
- краткое описание метода
- таблица результатов измерений, выраженных в числе интерференционных полос, числе длин волн и в микрометрах.

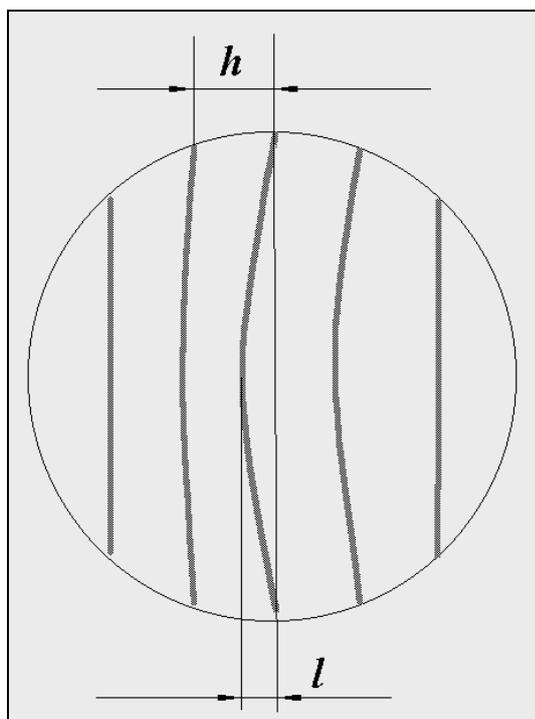


Рис. 11 . Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме

### Контрольные вопросы по лабораторной работе

Для чего в схеме интерферометра Физо при контроле сферической оптической поверхности используется мениск?

Поясните, какую роль выполняет фронтальная поверхность мениска?

Укажите, какой источник света используется в лабораторной работе. Уточните рабочую длину волны источника света.

Для чего в интерферометре используется выключенная линза Бертрана?

Для чего в интерферометре используется включенная линза Бертрана?

Поясните, как можно изменить ориентацию полос интерференционной картины и их число.

Как определяется величина ошибки оптической поверхности?

### Литература

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. Изд-во СПб ГУ ИТМО. 2006.
2. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. ЛИТМО. 1989.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.:Машиностроение.1983.

# ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОБЪЕКТИВА МИКРОСКОПА НА ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С РЕШЕТКОЙ РОНКИ

## Теоретический материал

### Принцип метода

Принцип действия интерферометра состоит в наложении и интерференции двух взаимно когерентных сферических волновых фронтов в режиме интерференции сдвига (рис. 1).

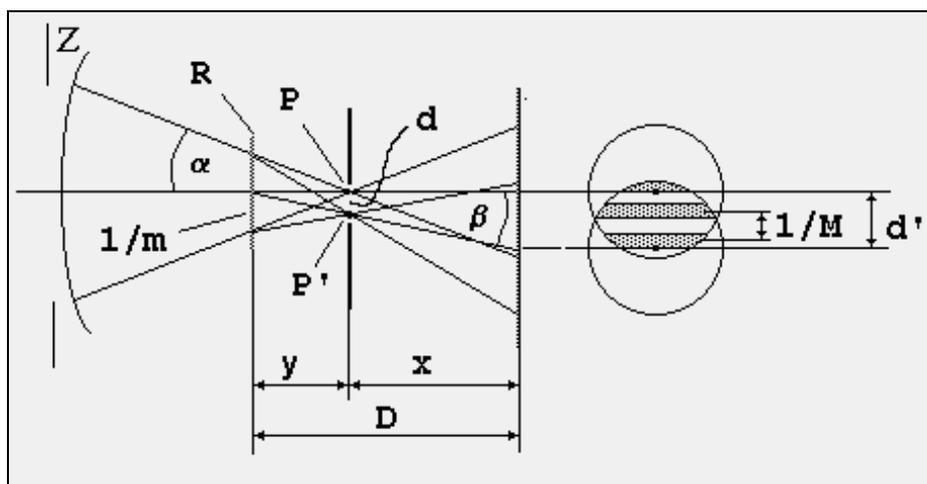


Рис.1 Волновые фронты, формирующие интерферограмму Ронки

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 расстояние  $y$ . Это расстояние считается положительным, если отсчет производится в направлении, обратном направлению распространению света.

При этом по обеим сторонам от точки  $P$  образуются дифракционные спектры различных порядков, имеющие для монохроматического света вид точек. Расстояние между спектрами для малых углов дифракции равно

$$d = y \cdot \beta,$$

где  $\beta$  - угол дифракции.

$$\beta = m \cdot \lambda$$

Отсюда

$$d = y \cdot m \cdot \lambda$$

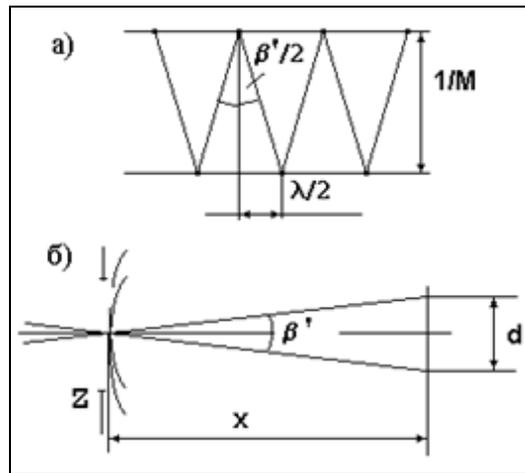


Рис.2. Интерференционный механизм образования полос

Итак, решетка порождает ряд дифрагированных волн. Диафрагмой выделим из всей совокупности дифрагированных фронтов только два соседних фронта, повернутых на угол  $\beta$  и смещенных на расстояние  $d$  один относительно другого (рис. 1) .

После концентрации в точках  $P$  и  $P'$  сферические фронты расходятся, образуя в той области пространства, где они перекрываются с заклоном на угол  $\beta'$ , интерференционные полосы (рис.2а). (Под углом  $\beta'$  наблюдаются дифракционные спектры  $P$  и  $P'$  из центра зрачка  $Z$  исследуемой оптической системы, рис.2б).

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

Расстояние между интерференционными полосами (шаг интерференционных полос) составляет

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda}{\beta'}$$

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

Имея в виду, что

$$d = y \cdot m \cdot \lambda,$$

находим, что

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda \cdot x}{y \cdot m \cdot \lambda};$$

$$\frac{1}{M} = \frac{x}{y \cdot m}.$$

Отсюда получаем соотношение:

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

Физический смысл сокращения величины  $\lambda$  очень интересен. Он состоит в том, что работа данного интерферометра сочетает явления как интерференции, так и дифракции.

При дифракции (3) *увеличение* длины волны  $\lambda$  влечет за собой *увеличение* расстояния  $d$  между спектрами, как видно из формулы (3). Это соответствует *увеличению* угла взаимного заклона дифрагированных фронтов  $\beta'$  и должно было бы сопровождаться увеличением частоты интерференционных полос (5).

Однако в процессе *интерференции* дифрагированных фронтов, наложенных под углом  $\beta'$ , то же *увеличение*  $\lambda$  влечет за собой, как видно из выражения (6), пропорциональное *уменьшению* частоты полос, соответствующих той же величине деформации (в данном случае заклона) волнового фронта. В итоге частота интерференционных полос в интерферометре Ронки (для ахроматической исследуемой системы) не зависит от длины волны излучения, а связана лишь с частотой решетки и геометрическими соотношениями в схеме, что, при небольших апертурах исследуемых систем, позволяет описывать механизм формирования полос Ронки просто теньвым отображением штрихов решетки (рис.3). Это же позволяет вести исследования интерферометре данного типа с применением источника белого света.

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

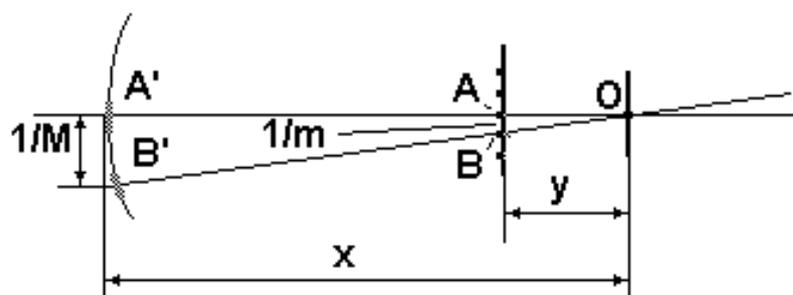


Рис.3. Зависимость частоты решетки и частоты интерференционных полос

Итак, частота интерференционных полос связана с частотой решетки соотношением:

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

При отсутствии деформаций наложенных фронтов эти полосы прямолинейны, параллельны и отстоят друг от друга на равные промежутки (рис.5а).

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

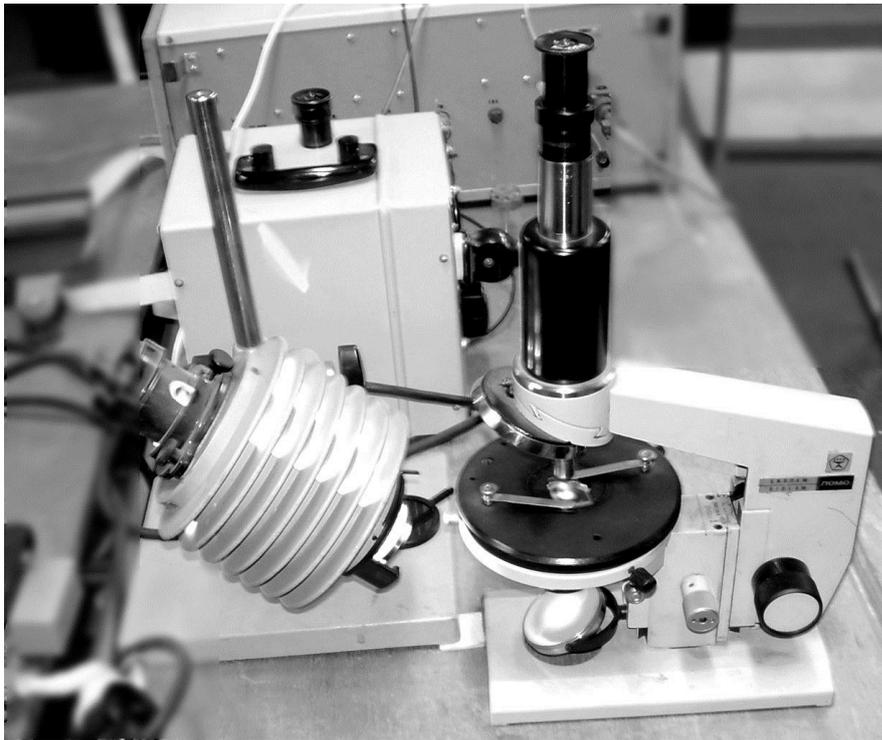


Рис.4. Интерферометр Ронки для исследования ахроматических и хроматических aberrаций микрообъективов

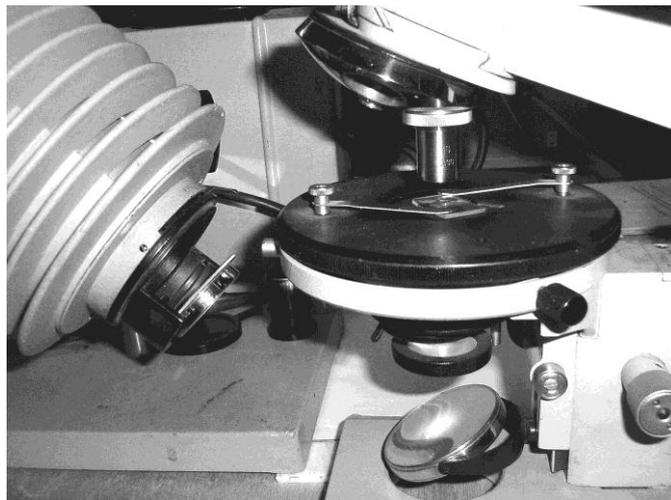


Рис.5. Точечный препарат на предметном столике интерферометра по схеме Ронки содержит субмикронную щель, применяемую для формирования тест-объекта «светящаяся линия»

# Лабораторная работа

## Задание для работы

1. Настроить интерферометрическую схему контроля с исследуемым микрообъективом.
2. Выполнить качественное исследование характера монохроматических и хроматических aberrаций исследуемых микрообъективов на интерферометре по схеме Ронки.
3. Сопоставить интерферограмму Ронки с интерферограммой для того же объектива, полученной на лазерном интерферометре с дифрагированным опорным волновым фронтом.
4. Измерить частоту интерференционных полос по среднему сечению картины Ронки в двух длинах волн и рассчитать хроматическую разность для исследуемого микрообъектива.

## Технические характеристики установки

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

## Схема установки

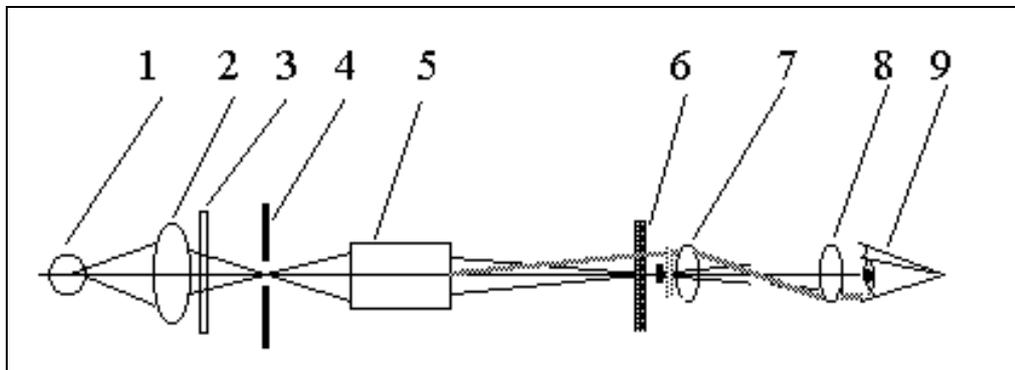


Рис.6 Схема установки

- 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

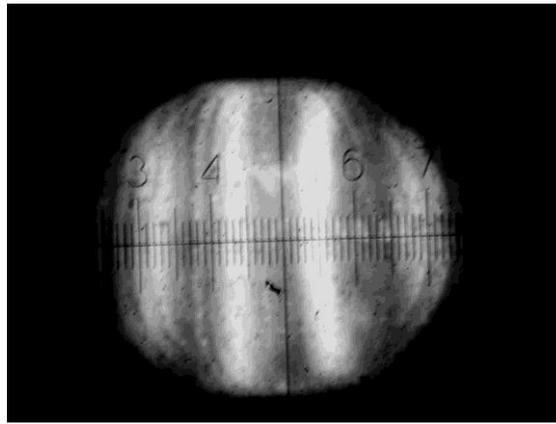


Рис.7. Интерферограмма Ронки

### Проведение измерений

Получить интерферограммы поочередно от 2 -х объективов.

Для этого:

1. С помощью окуляра (в микроскопе), необходимо сначала сфокусироваться на тест-объект (точечный препарат), помещенный на предметный столик микроскопа.

Найти вертикально расположенный светлый штрих, который материализует тест-объект «светящаяся линия».

Подвижками столика привести тест-объект в центр поля.

2. Необходимо заменить окуляр на вспомогательный микроскоп (трубку Мир-4) и сфокусироваться на выходной зрачок исследуемого микрообъектива.

С помощью фокусировки вспомогательного микроскопа найти положение, при котором в зрачке наблюдается система параллельных темных полос на светлом фоне.

При недостаточном контрасте полос необходимо повернуть трубку Мир-4 в тубусе микроскопа так, чтобы направление штрихов решетки также стало вертикальным и совпало с направлением тест-объекта «светящаяся линия».

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

3. По виду интерференционной картины оценить характер aberrаций исследуемого микрообъектива (рис.8).

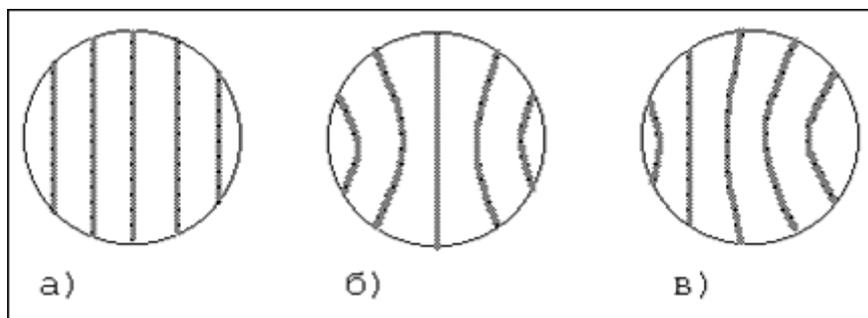


Рис. 8 Вид интерференционной картины  
а) отсутствие aberrаций; б) сферическая aberrация; в) кома

4. Сопоставить характер и количественную оценку aberrаций данного микрообъектива, наблюдаемые на интерферометре Ронки, с характером и величиной

аббераций того микрообъектива, определяемые параллельно на лазерном интерферометре с дифрагированной опорной волной (лабораторная работа №3).

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

Имея в виду, что (7) 
$$\frac{M}{y} = \frac{m}{x},$$

значение  $y$  составит

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

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

Для двух исследуемых длин волн имеем

$$y_{\lambda 1} = \frac{M_{\lambda 1} \cdot x}{m},$$

$$y_{\lambda 2} = \frac{M_{\lambda 2} \cdot x}{m}.$$

Хроматическая разность методом в интерферометре Ронки определяется как

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

### Отчет

В отчете должны быть представлены:

- схема установки
- краткое описание метода
- таблица результатов измерений, выраженных в числе интерференционных полос, числе длин волн и в микрометрах.

### Контрольные вопросы по лабораторной работе

Поясните, в чем состоит принцип действия интерферометра с решеткой Ронки.

Объясните, в каком случае расстояние между решеткой и центром кривизны сферической волны считается положительным.

Как вычисляется расстояние между спектрами для малых углов дифракции?

Объясните физический смысл сокращения величины  $\lambda$  в уравнении

Укажите свойство интерферометра Ронки, позволяющее использовать его при исследованиях хроматизма.

Как определяется частота интерференционных полос  $M$ ?

Какой вид имеют интерференционные полосы при отсутствии деформаций наложенных фронтов?

Что представляет собой возникающая в схеме интерферометра Ронки интерференционная картина?

Какую форму будет иметь интерференционная картина при наличии сферической абберации и при наличии комы?

По какой формуле определяется хроматическая разность методов в интерферометре Ронки в зависимости от пространственной частоты  $m$ ?

## **Литература**

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. Изд-во СПб ГУ ИТМО. 2006.
2. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. ЛИТМО. 1989.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.:Машиностроение.1983.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОШИБОК ФОРМЫ ВОГНУТОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЛАЗЕРНОМ НЕРАВНОПЛЕЧЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

## Теоретический материал

### Принцип метода

Принцип действия интерферометра состоит в наложении и интерференции двух взаимно - когерентных сферических волновых фронтов.

Один из фронтов сформирован отражением от образцового сферического зеркала, ошибки которого считаются пренебрежимо малыми.

Второй волновой фронт сформирован отражением от исследуемого вогнутого сферического зеркала, ошибки которого исследуются.

Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения идеальной сферической волны, сформированной отражением от образцового сферического зеркала, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности в автоколлимационной схеме.

### Интерферометрия

В 1918 г. Твайман сообщил о своем методе оценки aberrаций.

Суть его состояла в сравнении плоского волнового фронта с фронтом волны от исследуемой системы, форма которой приведена к плоской для случая отсутствия ошибок и aberrаций. Т.е. речь шла об интерферометрическом методе, когда проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны.

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

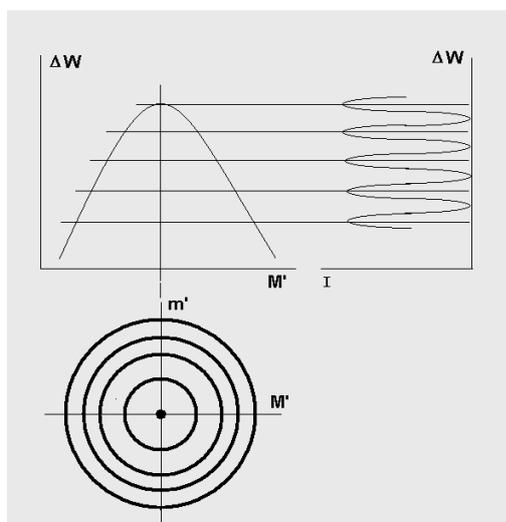


Рис. 1. Схема метода интерферометрии для варианта точной продольной и поперечной настройки интерферометра

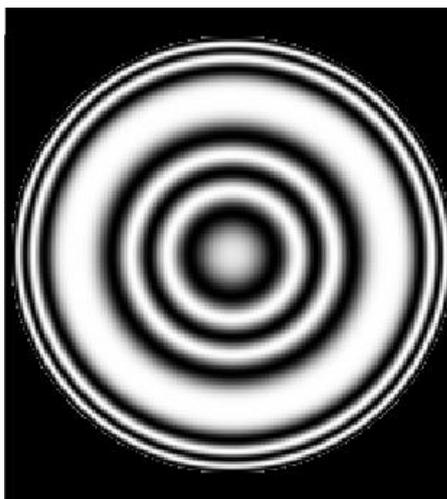
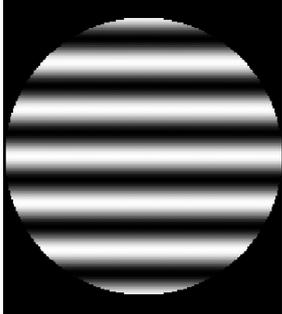
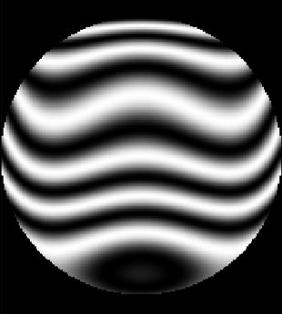
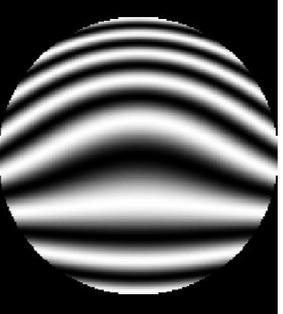
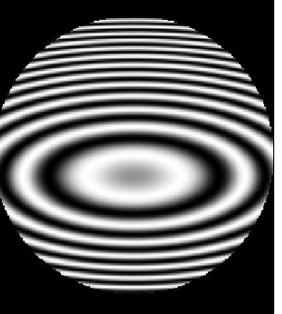


Рис.2. Вид интерферограммы, полученной в соответствии со схемой по рис.1.

Таким образом, метод интерферометрии сочетает достоинство наглядности, подобно теневого 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. В таблице 1 рассмотрена форма интерференционной картины для ряда типовых aberrаций.

Таблица 1 Формы интерференционных картин

			
Отсутствие aberrаций	Сферическая aberrация	Кома	Астигматизм

Ограничение интерферометрического метода в его исходной форме состоит в том, что освещенность, поперек полосы изменяется по синусоидальному закону, контуры полос неотчетливы и поэтому погрешность визуальной расшифровки не менее 0,05 ширины полосы.

Современные методы специальной регистрации дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине при оптических измерениях, но и преобразовать структуру изображения к виду, позволяющему достичь максимально возможной точности при его расшифровке, в том числе и при помощи устройства автоматического ввода графиков в ЭВМ, Например, каждая интерференционная полоса синусоидальной структуры трансформируется в пару четких контуров.

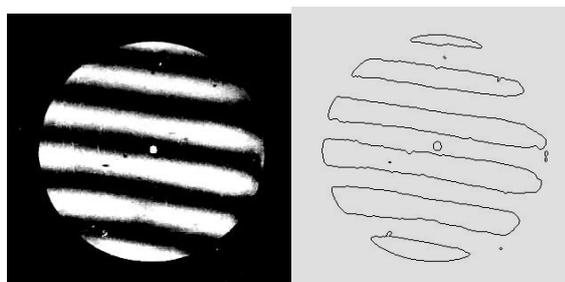


Рис.3. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности расшифровки интерферограммы

## Интерферометр Тваймана

Для оптического контроля и измерений было бы желательно использовать экспресс методы, обеспечивающие точную количественную информацию обо всем исследуемом фронте волны. Начало XX века ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии.

В 1918 году Твайман сообщил о методе интерферометрии аберраций объективов и ошибок оптических поверхностей. Суть состояла в сравнении плоского опорного волнового фронта с фронтом от исследуемой системы или поверхности, форма которого приведена к плоской для случая отсутствия ошибок. Таким образом, проблема исследования оптической системы ставится как задача непосредственного выявления и измерения деформаций, претерпеваемых поверхностью волнового фронта.

Интерферометрия позволяет, при точно сфокусированном интерферометре, получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности, где горизонталы (изолинии уровня) представлены в виде полос с интервалом, кратным длине световой волны.

При поперечной расфокусировке интерферометра, предложенного Твайманом, возникает система полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка. Таким образом, интерферометрия соединяет достоинство наглядности теневого метода и возможности количественных оценок и измерения деформаций волнового фронта, присущее методу Гартмана.

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

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

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

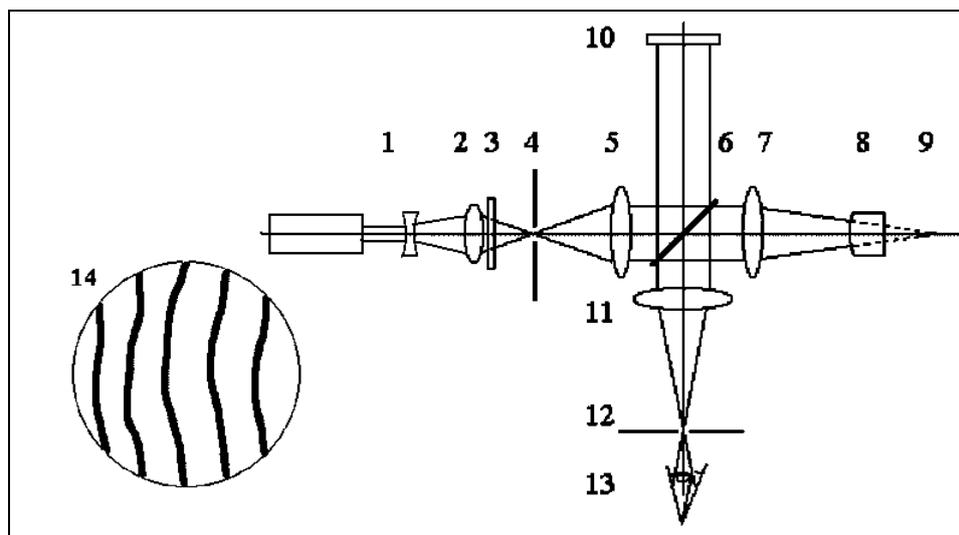


Рис.4. Интерферометр Тваймана для исследования объектива

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

Такие решения 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.

### **Оптический измерительный комплекс на базе лазерного дифракционного интерферометра**

#### **Требования к точности образцовых элементов для классических и традиционных интерферометров**

Разность хода  $\delta$  лучей света с длиной волны  $\lambda$  для образцового волнового фронта и рабочего фронта, отраженного по нормали к исследуемой поверхности, составит:

$$\delta = 2 \cdot h$$

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

$$I = 2 \cdot a^2 \cdot (1 + \cos(\frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{\lambda}))$$

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]:

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

Разность хода в волновой мере обозначим как :

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

Если одна волновая поверхность повернута относительно второй на угол  $\theta$ , 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 [7]:

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

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

Последнее выражение 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  $\omega$  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) характеризуются тем, что для формирования опорного волнового фронта в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (обычно – образцовой оптической поверхности, плоской или сферической).

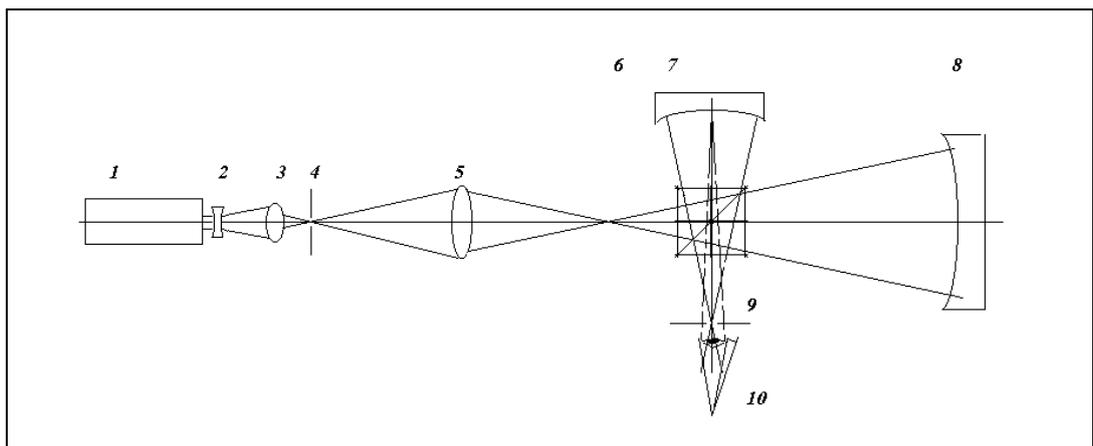
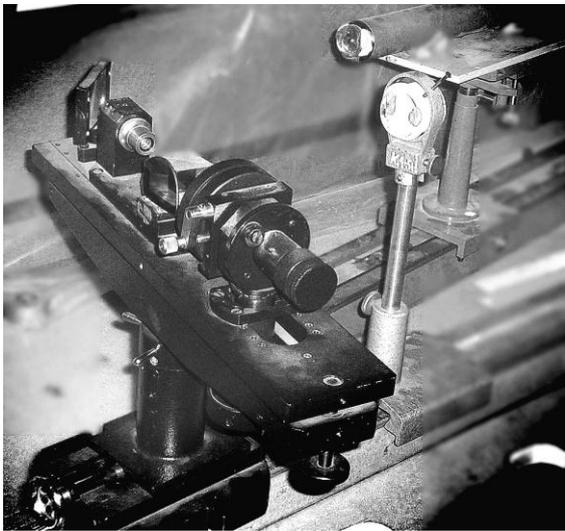
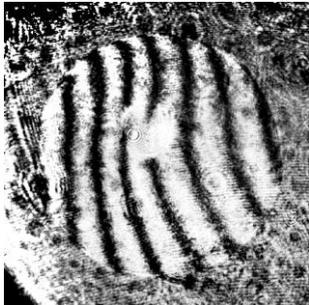


Рис. 5. Лазерный неравноплечий интерферометр со сферической образцовой поверхностью

- 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)

	
<p>Рис.6. Лазерный неравноплечий интерферометр – общий вид</p>	<p>Рис.7. Интерферограмма оптической поверхности (очковая линза)</p>

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

1) Остаточные ошибки изготовления.

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

- 2) Возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали. Наличию таких изменений могут способствовать:
- а) динамические воздействия (например, пережатие в оправках);
  - б) гравитационные воздействия (нарушение разгрузки детали);
  - с) температурные воздействия;
  - д) вибрационные воздействия.

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

$$I'' = \cos^2 \cdot (\pi \cdot (v \cdot y + \omega + \omega_R))$$

здесь  $\omega_R$  - ошибка образцового волнового фронта.

Итак, точность интерференционного контроля при соблюдении прочих условий, решающим образом определяется величиной  $\omega_R$ .

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

Здесь  $\omega_T$  - предельно допустимая ошибка образцового волнового фронта прибора для контроля образцовой поверхности интерферометра.

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

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

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

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

Таблица 2

Тип оптической системы	Требования к точности системы	Требования к точности прибора контроля	$\omega_R$	$\omega_T$
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	$0.03\lambda$	$(0.003 - 0.006) \lambda$	$0.0045\lambda$	$0.00045 - 0.0009 \lambda$

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

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

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

Тест-объект "светящаяся точка"4 фокусируется исследуемой системой или деталью 6 в плоскость полупрозрачного покрытия 10 пластины 9, содержащего точечную диафрагму. Часть света, прошедшая полупрозрачное покрытие, распространяется в направлении наблюдательной системы в виде рабочего сферического волнового фронта 12, искаженного 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 измерения которого пришлось бы выполнять операцию замены пластинки и повторной настройки схемы), но и от положения изображения точечного тест-объекта (пятна рассеяния) относительно точечной диафрагмы. Кроме того, смещение пятна относительно диафрагмы более чем на половину диаметра пятна приводит к гашению опорного пучка лучей в интерферометре, что влечет за собой исчезновение интерференции.

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

Недостатки схемы Линника, на наш взгляд, следующие:

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

## 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  $k$ :

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

С другой стороны, анализ ФП метода интерферометрии деформаций волнового фронта показывает, что относительная интенсивность в интерференционной картине  $\tilde{I}$  связана с искажениями волнового фронта  $\omega$  (в волновой мере) периодической зависимостью (рис. 7):

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

Здесь  $\tilde{I} = I_i / I_0$ , где  $I_i$  - значение интенсивности в данной точке интерференционного изображения;  $I_0$  - интенсивность в той же точке при отсутствии аберрации;  $\omega = W / \lambda$ ; где  $W$  - нормальное отклонение волнового фронта;  $\lambda$  - длина волны излучения в интерферометре.

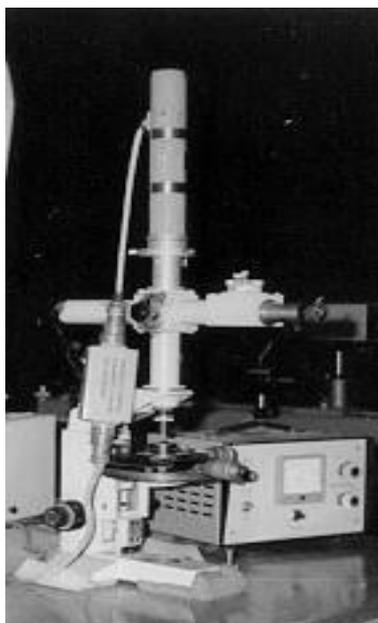


Рис. 8. Дифракционный интерферометр для исследования объективов микроскопов

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  $\theta$ , причем возникает несущая частота  $\nu$ :

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

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.7). Введение в характеристику преобразования дополнительной координаты (здесь - заклон на угол  $\theta$ ) позволяет достичь качественного скачка, когда карта деформаций волнового фронта (как система изолиний - "горизонталей" карты деформаций с шагом дискретизации, равным или кратным длине световой волны) преобразуется в систему полос, соответствующих системе профилей поверхности ошибок исследуемого волнового фронта. Такой прием повышает наглядность интерферограммы, облегчает ее расшифровку и особенно важен, когда измеряемые ошибки меньше шага дискретизации, то есть меньше цены шага интерференционной полосы (то есть  $\lambda/2$  или  $\lambda$ ). В работе [3] дан анализ возможностей и ограничений методов и средств исследования прецизионных поверхностей. Недостатки плавных характеристик преобразования:

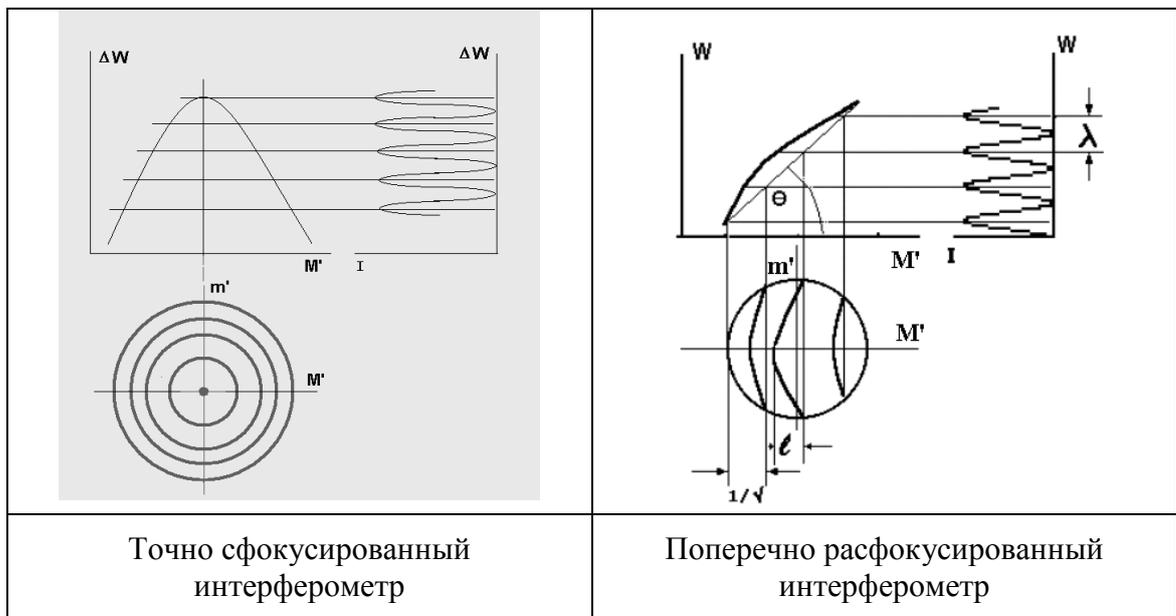


Рис. 9. Схема функционирования периодической функции преобразования

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

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

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

В частности, в принятый ряд базовых ФП внесены:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

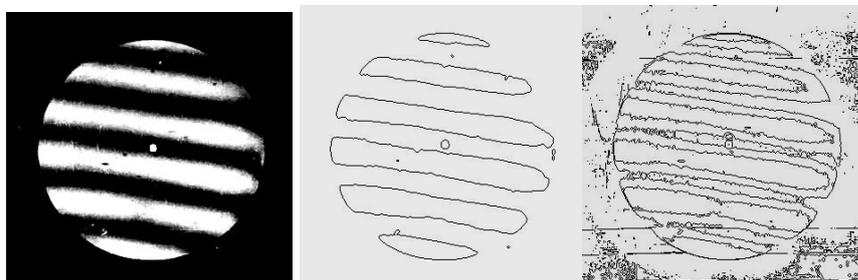


Рис. 10. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос

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

Итак, в данных дифракционных интерферометрах генерация неискаженного сферического эталонного фронта волны основана на использовании хорошо

воспроизводимого физического явления дифракции лазерного пучка на точечном отверстии диаметром, соизмеримым с длиной волны. В этих приборах отсутствует образцовая оптическая деталь и присущие ей неизбежные остаточные погрешности, возникающие при изготовлении.

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

## Анализ погрешностей метода интерферометрии

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

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

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

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

Распределение интенсивности интерферограммы формируется в два этапа:

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

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

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

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

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

$$I_{\Sigma 1} = I_{ИНТ} \otimes I_{ФРТП}$$

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

$$I_{\Sigma 2} = I_{\Sigma 1} \otimes I_{\Phi PT(\Gamma)}$$

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

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

Предлагается, наряду с рассмотренными способами повышения резкости интерферограммы, также способ повышения резкости, основанный на трансформации структуры изображения (рис. 29).

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

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

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

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

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

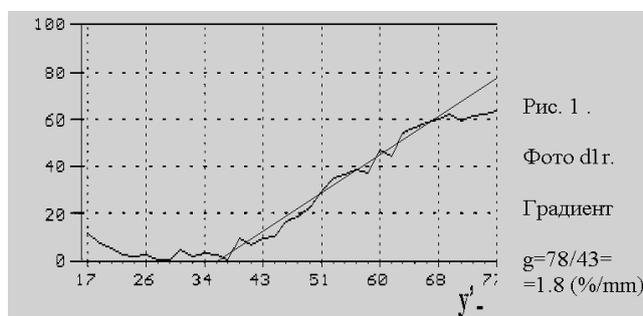


Рис. 11-а'

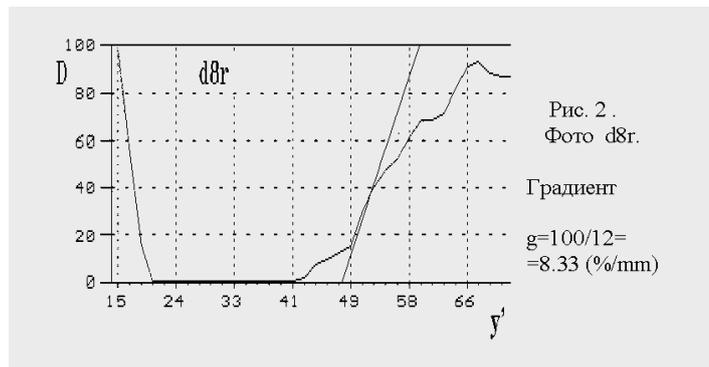


Рис. 11-б'

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

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

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

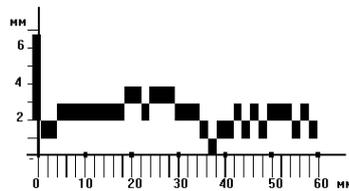


Рис. 12 Влияние шума вдоль штриховой границы полосы

Статистическая обработка дала следующие результаты:

$$\sigma_{z'} = \pm 0.087 \text{ мм},$$

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

Таким образом, можно считать, что под влиянием шумов штриховая граница расширяется в 2 раза. Итак, с учетом шумов изображения, точность локализации координаты границы в результате оконтуривания пограничной зоны в интерферограмме (рис. 13) возрастает не менее, чем в 4 раза.

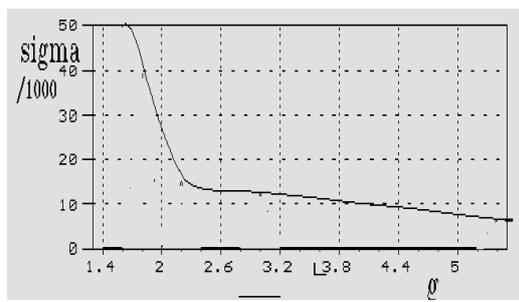


Рис. 13.

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

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

### **Снижение погрешностей расшифровки интерферограмм средствами прикладной фоторегистрации**

Ошибки восстановления волнового фронта при интерферометрических исследованиях в значительной степени определяются погрешностями расшифровки интерферограммы, т. е. измерения положения полосы. Распределение освещенности при двухлучевой интерферометрии является синусообразным по направлению нормали к полосе. Максимум распределения освещенности при этом широк и неудобен для измерений: края полос размыты, наведение на них перекрестия измерительного прибора дает лишь ограниченную точность измерения.

Погрешность наведения на полосу может быть существенно уменьшена, если распределение оптической плотности в интерферограмме преобразовать из косинусоидального к виду, показанному на рис.8б, т.е. привести к случаю высокоточной биссекториальной наводки. Такое преобразование изображения (оконтуривание) может быть достигнуто применением фотографического процесса со специфической характеристической кривой (рис. 9). Необходимая форма характеристики получается, как и в изофотометрических исследованиях, путем воспроизведения при обработке фотоматериала эффекта Сабатье. Вид интерферограммы без дополнительной обработки и после оконтуривания показан на рис. 10.

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

Результаты исследования позволили сделать следующие выводы:

1. погрешность расшифровки неоконтуренных интерферограмм возрастает с увеличением ширины полосы;
2. погрешность расшифровки оконтуренных интерферограмм убывает с увеличением ширины полосы;
3. погрешности расшифровки путем наведения на центр и края оконтуренной полосы практически однозначны;
4. применение оконтуривания беззернистой интерферограммы с широкими полосами позволяет уменьшить погрешность расшифровки до 30 раз.

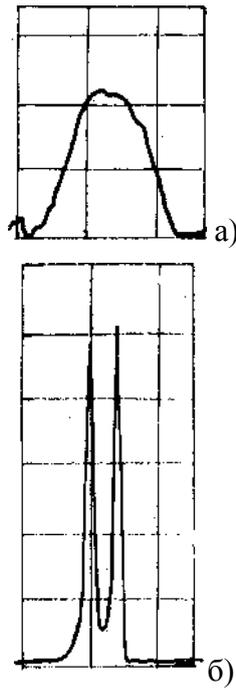


Рис.14. Распределение плотности в ннтерферограмме:  
 а — без дополнительной обработки; б — после оконтуривания

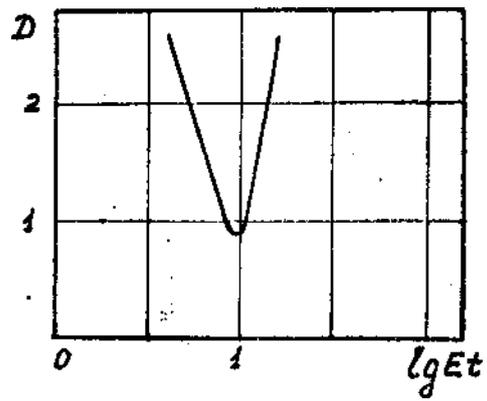
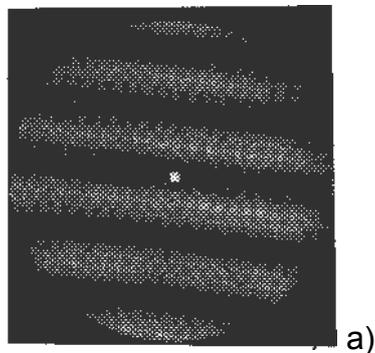


Рис.15. Характеристическая кривая фотоматериала при обработке с эффектом Сабатье



а)

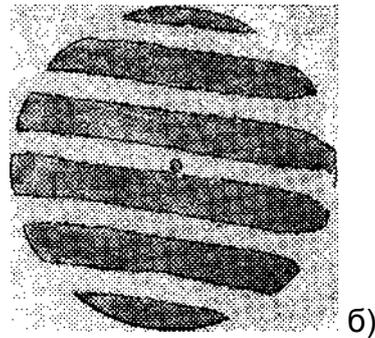


Рис.16. Вид интерферограммы:  
а - без дополнительной обработки; б — после оконтуривания

Таблица 3. Погрешности расшифровки интерферограмм

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

### 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:

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

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  $16 \text{ с}^{-1}$  и выше делает

визуальный интерференционный контроль невозможным, так как эффективный контраст становится нулевым и интерференционная картина не видна несмотря на то, что номинально она сформирована.

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

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



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

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

картины является эффективным *дополнительным* средством устранения вредного влияния вибраций при интерферометрии, причем *основным* средством здесь является виброизолированная платформа, например, интерферометрический стол, ввешенный на накачанных автомобильных камерах.

### **Контрольные вопросы по теоретической части**

Поясните, в чем состояла суть метода, предложенного Твайманом в 1918 году.

Укажите, какое преимущество имеет интерферограмма.

Укажите достоинства метода интерферометрии.

Объясните, как меняется форма интерференционных картин для ряда типовых аберраций.

Укажите, в чем состоит ограничение интерферометрического метода.

Каким образом может быть устранено влияние турбулентности воздуха.

Поясните, как можно рассчитать распределение относительной интенсивности в интерференционной картине при введении заклона поверхности?

Объясните, как формируется опорный волновой фронт в традиционных интерферометрах.

Каковы причины возникновения остаточных ошибок?

Укажите достоинства и недостатки классической схемы интерферометра Линника.

Укажите два способа контроля асферических поверхностей.

Объясните, каким образом возможно увеличить точность метода интерферометрии.

Поясните, каким образом формируется распределение интенсивности интерферограммы.

Поясните, как изменяется интерференционная картина при применении метода изофотометрии.

Объясните, как может быть уменьшена погрешность наведения на полосу.

Чему равно общее перемещение системы полос?

Что происходит с интерференционной картиной при смещении исследуемой поверхности на  $\lambda/2$ , на  $\lambda/4$ , на  $\lambda/8$ ?

Перечислите преимущества метода серийной фоторегистрации

# Лабораторная работа

## Задание для работы

1. Изучить схему и конструкцию неравноплечего лазерного интерферометра на примере лабораторной установки интерферометрии вогнутой сферической поверхности.
2. Настроить интерферометрическую схему контроля вогнутой сферической поверхности
3. Визуально оценить ошибку по интерферограмме в долях шага полосы.
4. Дать оценку качества вогнутой сферической поверхности.

## Технические характеристики установки

1. Источник света: - гелий - неоновый лазер,  $\lambda=0.6328$  мкм
2. Образцовая поверхность: вогнутое сферическое зеркало (местная ошибка не более  $1/20$  длины волны).

## Схема неравноплечего лазерного интерферометра

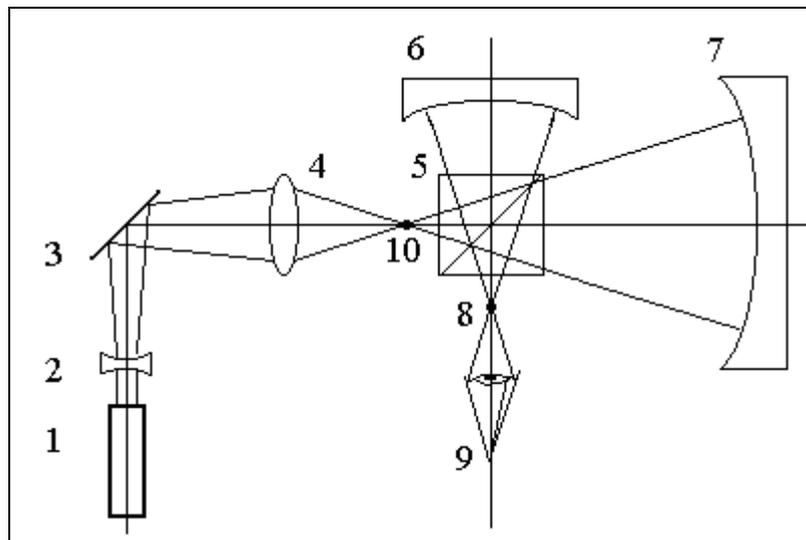


Рис. 18 Схема установки

## Проведение измерений

Получить и настроить интерференционную картину ошибок поверхности исследуемого сферического вогнутого зеркала.

Для этого, используя матовый экран, сначала ищут автоколлимационные блики с помощью подвижки интерферометра вдоль и перпендикулярно оптической оси, а также при помощи механизмов вертикальной и продольной подвижки образцового зеркала. После фокусировки бликов визуально (или на матовом экране при затемнении помещения) наблюдают интерференционную картину. Число интерференционных полос и их ориентацию можно менять с помощью подвижек интерферометра вдоль оптической оси.

По виду интерференционной картины определить величину деформации волнового фронта  $\Delta N$  исследуемого микрообъектива как отношение максимальной стрелки прогиба интерференционной полосы  $h$  к шагу полосы  $l$  (рис.19):

$$\Delta N = \frac{h}{l}.$$

Повторить исследования при различных направлениях интерференционных полос. Результаты занести в таблицу исследований.

Выразить величину деформации волнового фронта в количестве длин волн  $\lambda$  и в микрометрах. (Цена шага интерференционных полос в данной автоколлимационной схеме составляет  $\lambda/2$ )

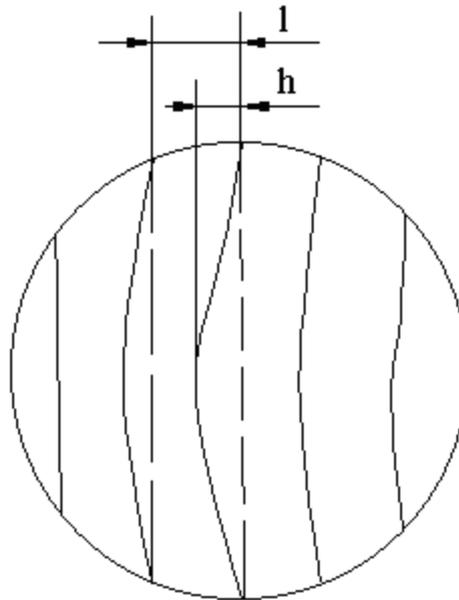


Рис. 19. Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме

### Отчет

В отчете должны быть представлены:

- задание на исследование
- схема установки
- краткое описание метода
- методика настройки интерферометра
- таблица измерений.

### Контрольные вопросы по лабораторной работе

Для контроля каких поверхностей используется неравноплечий интерферометр?

Какое свойство лазера позволяет использовать в интерферометре только одну образцовую поверхность небольшого радиуса?

Укажите недостаток схемы неравноплечего интерферометра.

Какой должна быть волновая aberrация для получения высокой точности интерференционной картины?

Укажите разновидность неравноплечего интерферометра.

Как осуществляется увеличение точности в лазерном многоходовом неравноплечем интерферометре?

Укажите принцип действия интерферометра и способ образования каждого из волновых фронтов.

Что представляет собой интерференционная картина?

Поясните, каким образом можно изменить число интерференционных полос и их ориентацию.  
Как определяется величина деформации волнового фронта микрообъектива?

### **Литература**

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. Изд-во СПб ГУ ИТМО. 2006.
2. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. ЛИТМО. 1989.
3. Оптический производственный контроль. Под. ред. Д.Малакары. М. Машиностроение. 1985.

## Содержание

Введение	3
<b>Исследование микрообъективов на лазерном телевизионном изофотометре</b>	4
Теоретический материал. Принцип метода	4
Компьютерная изофотометрия ФРТ	5
Контрольные вопросы по теоретической части	8
Лабораторная работа	9
Задание для работы	9
Контрольные вопросы по лабораторной работе	11
Литература	11
<b>Исследование фотообъективов на телевизионном изофотометре по функции рассеяния линии (ФРЛ)</b>	12
Теоретический материал. Принцип метода	12
Контроль качества изображения по функции рассеяния линии	12
Метод изофотометрии ФРЛ	14
Компьютеризация изофотометрии ФРЛ	16
Методика компьютерной обработки данных изофотометрии ФРЛ	18
Контрольные вопросы по теоретической части	20
Лабораторная работа	21
Задание для работы	21
Контрольные вопросы по лабораторной работе	23
Литература	24
<b>Исследование аберраций микрообъективов на лазерном интерферометре с дифрагированным эталонным волновым фронтом</b>	25
Теоретический материал. Принцип метода	25
Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом, не требующие применения образцовых оптических элементов	25
Интерферометры с дифракцией на точечном отверстии для контроля ошибок формы прецизионных поверхностей	26
Интерферометр Линника	27
Неравноплечий дифракционный интерферометр	27
Относительно формы и структуры дифрагированного волнового фронта	30
Конструктивное решение интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом	33
Унифицированный интерферометр для контроля точной астрооптики	37
Интерферометр с голографической рассеивающей пластинкой	45
Контрольные вопросы по теоретической части	48

Лабораторная работа	50
Задание для работы	50
Контрольные вопросы по лабораторной работе	52
Литература	52
<b>Исследование ошибок поверхностей оптических деталей на лазерном автоматизированном интерферометре Физо</b>	<b>53</b>
Теоретический материал. Принцип метода	53
Контроль плоской поверхности	53
Контроль сферической поверхности	54
Контроль объективов на интерферометре Физо	56
Контрольные вопросы по теоретической части	58
Лабораторная работа	60
Задание для работы	60
Контрольные вопросы по лабораторной работе	61
Литература	61
<b>Исследование аберраций объектива микроскопа на интерферометре с решеткой Ронки</b>	<b>62</b>
Теоретический материал. Принцип метода	62
Лабораторная работа	66
Задание для работы	66
Контрольные вопросы по лабораторной работе	68
Литература	69
<b>Исследование ошибок формы вогнутой сферической поверхности на лазерном неравноплечем интерферометре</b>	<b>70</b>
Теоретический материал. Принцип метода	70
Интерферометрия	70
Интерферометр Тваймана	72
Оптический измерительный комплекс на базе лазерного дифракционного интерферометра	73
Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом, не требующие применения образцовых оптических элементов.	76
Функции преобразования в интерферометрии	77
Анализ погрешностей метода интерферометрии	81
Снижение погрешностей расшифровки интерферограмм средствами прикладной фоторегистрации	84
Снижение влияния вибраций при интерферометрии	86
Контрольные вопросы по теоретической части	88
Лабораторная работа	89
Задание для работы	89

Контрольные вопросы по лабораторной работе  
Литература

90  
91



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## **КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ**

Кафедра прикладной и компьютерной оптики – одна из крупнейших кафедр российских ВУЗов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. Поэтому на кафедре учат специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом, от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами другими приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкции.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики – ВНИЦ ГОИ им. С.И.Вавилова, ведущего оптического предприятия – ОАО "ЛОМО".

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П.Королева, Ю.А.Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета Оптико-информационных систем и технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте: <http://aco.ifmo.ru>.

**Владимир Константинович Кирилловский**  
**Марина Евгеньевна Зацепина**  
**Методы исследования и контроля качества оптических систем**  
**Учебное пособие к лабораторному практикуму**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО  
Зав. РИО  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99  
Подписано к печати \_\_\_\_\_  
Заказ № \_\_\_\_\_  
Тираж 250 экз.  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

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

