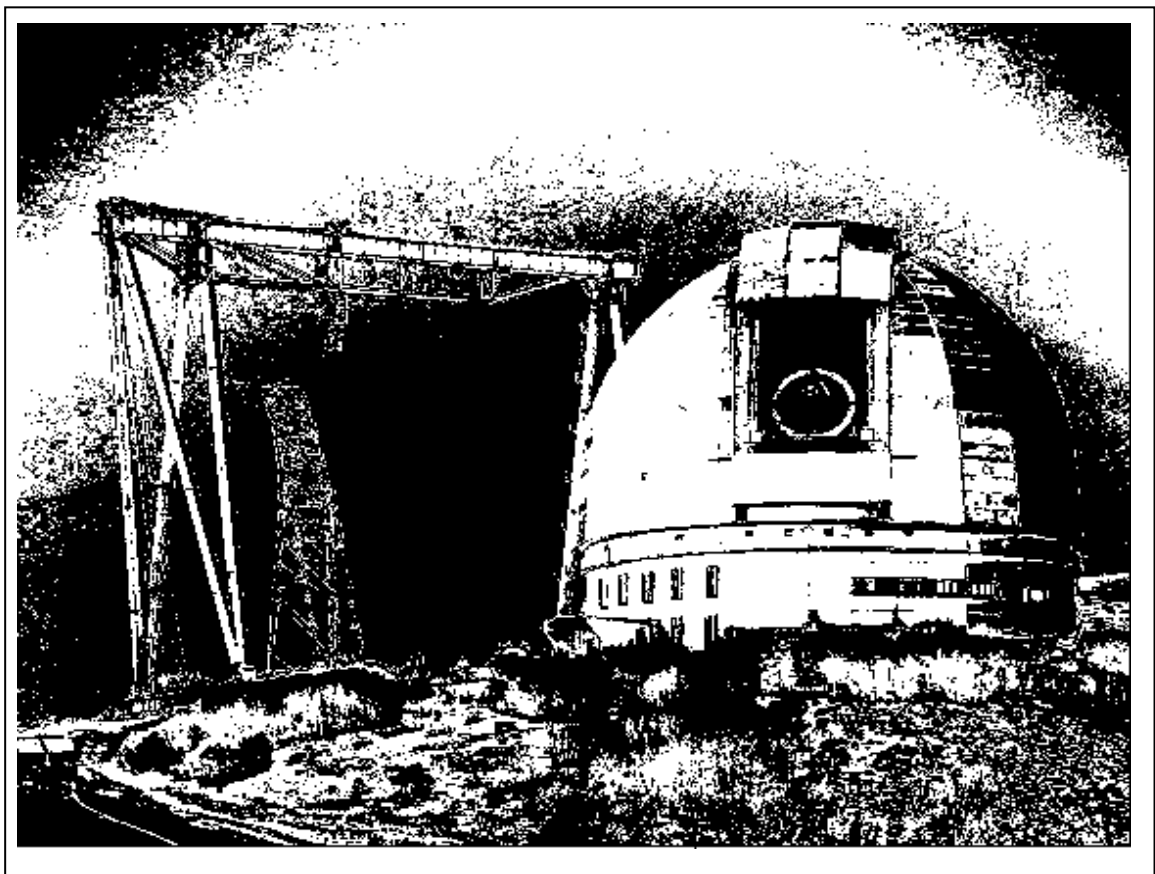


В.К.Кирилловский

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 3



**Санкт-Петербург
2005**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

В.К.Кирилловский

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 3

Функциональная схема прибора оптических измерений.
Типовые узлы. Оптические измерения геометрических параметров

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2005

УДК 535.317.2.

В.К.Кирилловский. Оптические измерения. Часть 3. Функциональная схема прибора оптических измерений. Типовые узлы. Оптические измерения геометрических параметров. Учебное пособие.

СПб ГУ ИТМО. 2005.- 67с.

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

В Части 3 рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры оптических измерений на основе обобщенной функционально-модульной схемы, предпосылки компьютерного моделирования этих процессов, типовые узлы приборов, методы и схемы для измерения геометрических параметров оптических систем и элементов.

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики 7.10.2004 г., протокол N 3.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 551900 - Оптотехника и направлению подготовки дипломированных специалистов 654000 - Оптотехника.

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

2005

©В.К.Кирилловский

2005

ВВЕДЕНИЕ

Успешная работа исследователя в оптической измерительной лаборатории зависит не только от хорошей оснащенности современными приборами, но и от знания и применения теоретических и технических аспектов современных оптических измерений, их возможностей и перспектив.

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

В Части 3 данного пособия рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры оптических измерений на основе обобщенной функционально-модульной схемы, предпосылки компьютерного моделирования этих процессов, типовые узлы приборов, методы и схемы для измерения геометрических параметров оптических систем и элементов.

Показана функциональная схема прибора оптических измерений и свойства типовых узлов.

Исходя из задач контроля для целей уникального, малосерийного, крупносерийного и массового производства оптических деталей и систем предельной точности и задач автоматизации производства, определены четыре группы приборов оптического производственного контроля и измерений и сформулированы требования к каждой группе.

С другой стороны, в результате ряда современных исследований разработана обобщенная функциональная структура прибора контроля с его разбиением на унифицированные функциональные модули. Введено понятие центрального модуля-анализатора, определяющего принцип действия данного прибора и, следовательно, применяемый метод контроля. Рассмотрены методические основы оптического производственного контроля с применением унифицированного комплекса автоматизированной аппаратуры.

Рассмотрены методы и схемы для оптических измерений геометрических параметров оптических элементов и систем.

Указаны пути применения компьютеров в оптическом приборостроении, измерениях и контроле.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Традиционно под принципиальной схемой прибора (установки) понимают *оптическую измерительную схему* с указанием необходимых перемещений [8].

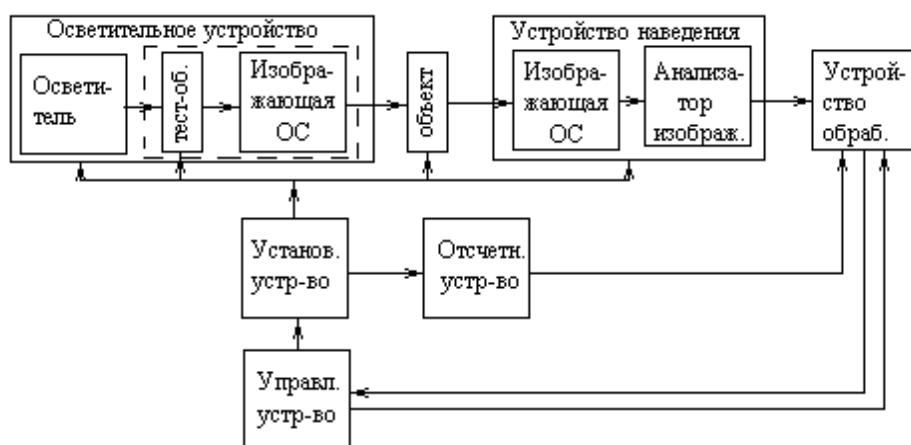


Рис.1. Функциональная схема оптического измерительного прибора

Под функциональной схемой понимают принципиальную схему, содержащую узлы, логически необходимые для выполнения измерения. Функциональная схема может использоваться для выбора характеристик прибора и анализа его действия, определения требований к отдельным узлам.

Традиционно принято давать следующее описание назначения отдельных узлов измерительного оптического прибора.

Осветитель (рис.1) предназначается для освещения тестовых объектов или объектов измерения. Обычно осветитель состоит из лампы накаливания, конденсора и светофильтра. Все чаще в качестве источников используются лазеры.

Тестовый объект (рис.1) - это типовый объект (точка, перекрестие, решетка, см. часть 1 данного пособия). Штриховой линией обведен узел, используемый в приборах, работающих с тестовыми объектами, и отсутствующий при измерении непосредственно по объекту [8].

Изображающая оптическая система (рис.1) предназначена для создания изображения объекта (или тест-объекта) в плоскости приемника и анализатора изображения. Деление оптических систем на типы производится, как обычно, по положению предмета и изображения [9].

Осветитель, тест-объект и изображающая оптическая система, стоящая перед измеряемой деталью объединяются в один функциональный блок - *осветительное устройство*, назначение которого состоит в создании светового потока, получающего под воздействием испытуемого объекта информацию об измеряемом параметре и обращающегося в оптический сигнал.

Анализатор изображения (рис.1) состоит из собственно анализатора (в смысле сетки, марки, сканирующей щели, вращающегося диска, раstra и т.д.) и приемника излучения (изображения). Анализатор изображения вырабатывает на выходе сигнал, который может указывать момент выполнения оптической измерительной наводки (наведения, установки, например, совпадение изображения объекта и окулярного перекрестия). В фотоэлектрических анализаторах этот сигнал, в отличие от оптического сигнала на входе, представляет собой электрический сигнал.

Устройство обработки информации обычно представляет собой совокупность аналоговых или аналого-цифровых преобразователей, встроенных в прибор микропроцессоров или отдельно расположенных компьютеров, снабженных специально разработанными программами.

В визуальных приборах обработку информации производит оператор.

Установочное устройство (рис.1) предназначается для перемещения отдельных узлов измерительного прибора относительно друг друга. Оно состоит из направляющих, передаточного механизма и привода.

Основные требования к установочным устройствам - чувствительность, точность и отсутствие значительного трения. В измерительных приборах используются специальные направляющие прямолинейного и вращательного движения. Установочное устройство функционально связано с тем узлом, которому придано рабочее смещение. Таким узлом может быть объект, изображающая система, анализатор изображения, система наведения в целом, отсчетное устройство.

Отсчетное устройство (рис.1) предназначено для получения отсчета (то есть определения по внутреннему эталону измерительного прибора числа, соответствующего выполненному наведению на объект), передачи отсчета на вход устройства обработки информации и его регистрации.

Для отчётных устройств характерны узлы, развертывающие шкалу прибора для определения её дробных частей. Развертывающие узлы делятся на механические, оптико-механические и оптические. В оптико-механических развертывающих узлах выполняется операция наведения на штрих основной шкалы, аналогичная наведению на объект, поэтому отсчетные системы можно рассматривать как "прибор в приборе" со своими устройствами подсветки и наведения.

В настоящее время широко используются матричные приемники информации. Принципиально они могут одновременно служить и

отсчетными устройствами, в которых носителем единицы протяженности является расстояние между элементами матрицы.

Управляющее устройство (рис.1) измерительного прибора предназначено для управления всем процессом измерения, от настройки прибора до получения результата измерения. Процесс измерения представляет собой последовательность перемещений, которые, как было сказано, можно разделить на настроечные и рабочие. Конструктивно управляющее устройство может быть совмещено с устройством обработки информации, например - компьютером.

Работа измерительного оптического прибора

Суммируя сказанное об отдельных функциональных устройствах измерительного оптического прибора, перечислим основные операции, выполняемые в процессе измерения [8].

Операции грубой настройки прибора - настройка освещения, центрирование, фокусирование и развороты вокруг оптической оси отдельных узлов прибора, а также установка всего прибора по отвесу. К этой же группе операций следует отнести установку объекта измерения.

Операции тонкой настройки прибора – это, обычно, фокусирование при поперечных измерениях и центрирование при продольных.

Операции "рабочее смещение" и "наведение". Непосредственно измеряемой величиной в наводящих измерительных оптических приборах служат продольные или поперечные координаты на объекте или интенсивность как функция от координат. При измерении координат рабочее движение представляет собой перемещение вдоль измеряемой координаты, наведение и отсчет. В случае измерения распределения интенсивности рабочим движением также является смещение по координатам на объекте или изображении и определение координаты элемента оптико-измерительного изображения.

Операция "снятие отсчета". Для визуальных отсчетных устройств эта операция состоит в наведении перекрестия сетки отсчетного устройства на штрих шкалы, а затем считывание значения по шкале.

Операция "обработка результатов наблюдений". В компьютеризированных приборах выполняется регистрация результатов отдельных измерительных наблюдений, которые затем используются для расчета измеряемых параметров.

Характеристики изображающих оптических систем

Изображающие оптические системы служат для формирования оптического измерительного изображения, то есть согласования объекта (или тест - объекта) с анализатором изображения.

Наиболее важными для *оптического измерительного прибора* являются структурные характеристики (см. Часть 2 данного пособия, а также [1, 2,3,8,9]).

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МОДУЛЬНАЯ ИДЕОЛОГИЯ СИНТЕЗА И УНИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Исследование обобщенной функциональной структуры прибора оптического контроля; блоки - модули

Рассмотрим принципиальные схемы распространенных установок контроля оптических деталей и систем существующими методами как ряд примеров [14]. Установка контроля крупно- или среднегабаритного сферического зеркала теньвым методом - рис.2.

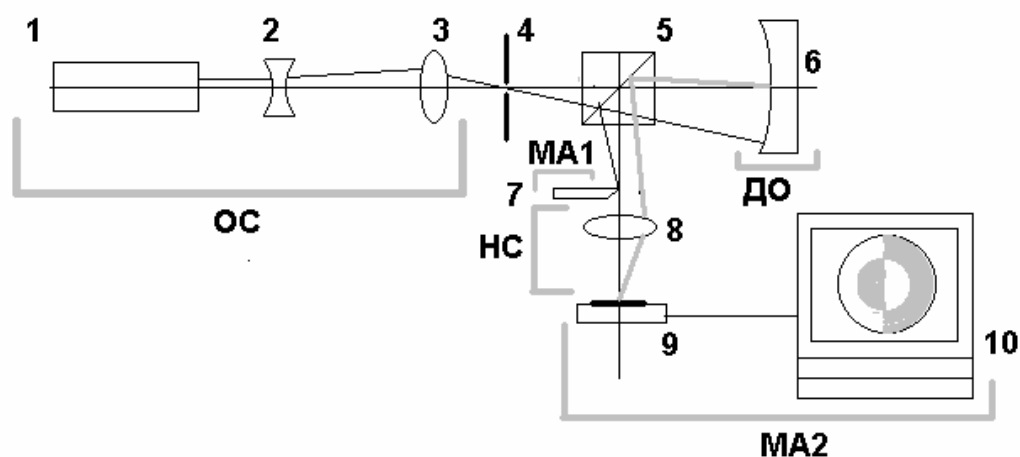


Рис. 2. Принципиальная схема установки контроля сферического зеркала теньвым методом

1 – лазер, 2 – 3 – осветительная система, 4 – точечная диафрагма, 5 – светоделиватель, 6 – объект исследования, 7 – нож Фуко, 8 – объектив наблюдательной системы, 9 – приемник изображения (матрица), 10 – компьютер

Установка контроля оптической поверхности методом Гартмана (рис.3).

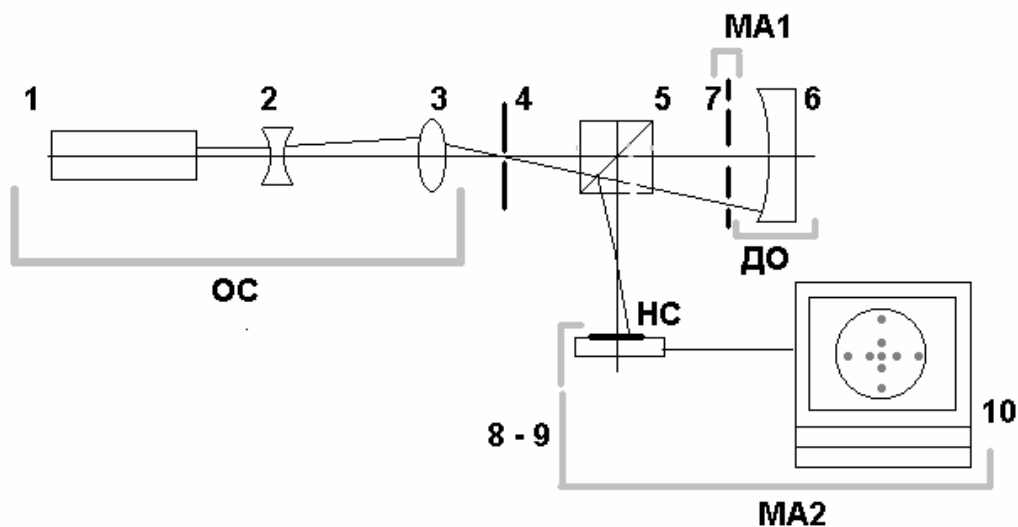


Рис. 3. Принципиальная схема установки контроля сферического зеркала методом Гартмана

1 – лазер, 2 – 3 – осветительная система, 4 – точечная диафрагма, 5 – светоделитель, 6 – объект исследования, 7 – диафрагма Гартмана, 8 – 9 – наблюдательная система с приемником изображения, 10 – компьютер

Неравноплечий лазерный интерферометр (рис.4).

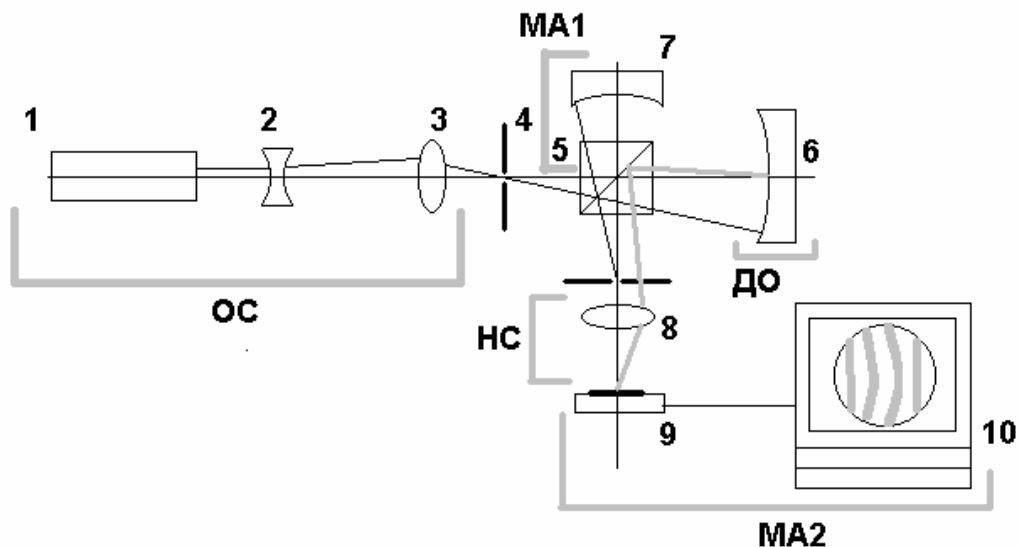


Рис. 4. Принципиальная схема установки контроля сферического зеркала на неравноплечем лазерном интерферометре

1 – лазер, 2 – 3 – осветительная система, 4 – точечная диафрагма, 5 – светоделитель, 6 – объект исследования, 7 – образцовая сферическая поверхность, 8 – объектив наблюдательной системы, 9 – приемник изображения (матрица), 10 – компьютер

Установка наблюдения и исследования структуры изображения тест-объекта, построенного исследуемой системой (рис.5).

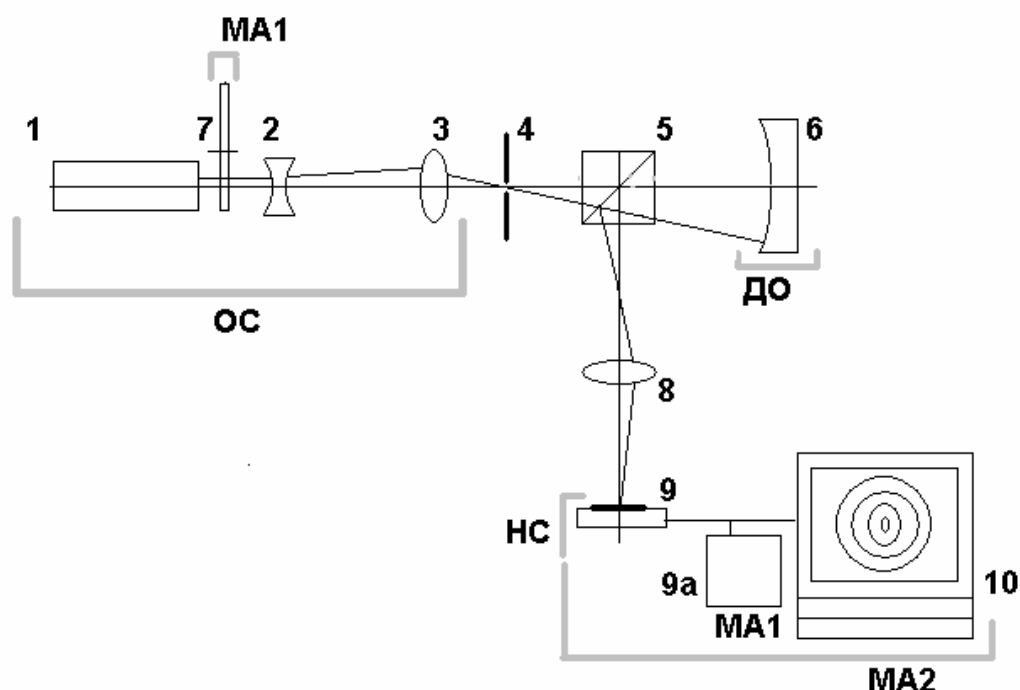


Рис.5. Принципиальная схема установки контроля сферического зеркала по ФРТ

1 – лазер, 2 – 3 – осветительная система, 4 – точечная диафрагма, 5 – светодетектор, 6 – объект исследования, 7 – переменный поглотитель (фотометрический клин), 8 – объектив наблюдательной системы, 9 – приемник изображения (матрица), 9a – блок обработки изображения, 10 – компьютер

Проанализировав приведенные и другие известные схемы установок оптического контроля, найдем, что каждая из них может быть разделена на функциональные модули, которые можно сгруппировать, выделяя в каждой схеме:

*осветительную систему (ОС),
наблюдательную систему (НС),
держатель объекта (ДО),
модуль-анализатор первой ступени (МА1),
приемник-анализатор изображения (модуль-анализатор второй ступени - МА2).*

Безусловно, важнейшей категорией в предлагаемом перечне является блок-анализатор, так как он определяет в конечном счете принцип работы прибора и характер (форму) его функции преобразования.

Дальнейшие исследования предложенного принципа позволили сформулировать определения.

1. Осветительная система - это оптическое устройство, формирующее пучок лучей требуемой конфигурации (структуры), поступающий в схему контроля и направленный на объект исследования.

2. Модуль анализатор - это оптическое устройство, которое, взаимодействуя с пучками лучей, поступающими в схему контроля (где в качестве оптического элемента присутствует объект исследования), обеспечивает формирование оптико-измерительного изображения.

Рассмотрим конкретные примеры.

1) В неравноплечем лазерном интерферометре модуль-анализатор включает в себя светоделитель и сферическое эталонное зеркало.

6) В установке контроля по методу Гартмана модуль-анализатор - диафрагма Гартмана (в качестве наблюдательной системы выступает фотопластинка).

7) В установке контроля по теневому методу с ножом Фуко анализатор - нож Фуко.

8) В установке контроля оптической системы по ФРТ (структуре пятна рассеяния) или другого изображения тест-объекта анализатором служит тест-объект, а также модулятор светового потока и экспозиции.

В случае, когда перед окончательной оценкой оптико-измерительное изображение подвергается дополнительной трансформации, устройство, обеспечивающее формирование окончательного оптического изображения, служит анализатором второй ступени. Часто в этой роли выступает ЭВМ или аналоговый приемник изображения, позволяющий трансформировать изображения или их структуру в нужном направлении. Объем и достоверность информации о свойствах системы в процессе ее контроля определяется в основном действием анализатора первой ступени. Анализаторы последующих ступеней определяют главным образом полноту использования выделенной визуальной информации, что, конечно, тоже немаловажно.

Итак, проводя анализ приведенных схем группы оптических установок, получаем возможность каждую из них расчленить на функциональные блоки-модули. Анализ схем и практика показывают также, что такие блоки, как осветительная система, наблюдательная система, приемник и анализатор изображения могут быть унифицированы для групп приборов контроля, работающих на различных принципах и выполняющих разные задачи контроля.

Таким образом, создаются предпосылки разработки глубоко унифицированного комплекса принципиально разных приборов контроля.

Итак, в унифицированном блочно-модульном комплексе приборов оптического контроля модулем-анализатором названо устройство, которое обеспечивает формирование оптико-измерительного изображения. Анализатором первого порядка (МА1) назовем оптическое устройство, в котором пучок лучей, поступивший в схему контроля (где в качестве оптического элемента присутствует объект исследования), обеспечивает формирование первичного оптико-измерительного изображения.

Многие традиционные на сегодня методы оптического контроля состоят в визуальном восприятии и экспертной оценке качества и характеристик объекта исследования по виду и особенностям наблюдаемого оптико-измерительного изображения. Однако в ходе решения задач повышения чувствительности и производительности оптического контроля, снижения трудоемкости и улучшения условий труда контролера, а также при автоматизации контроля, появляется необходимость трансформации оптико-измерительного изображения. Целями трансформации могут быть: выявление трудноразличимых элементов изображения, синтез новых контуров для повышения чувствительности контроля, повышение контраста и пограничных градиентов элементов изображения, синтез карты распределения интенсивности или графиков ее распределения, подготовка изображения к высокочувствительной цифровой обработке. Для выполнения указанных операций трансформации оптико-измерительных изображений требуется применение приемников-анализаторов изображения, реализующих соответствующую собственную функцию преобразования (ФП); назовем их модулями-анализаторами второго порядка (МА2). Результирующая форма обработанного изображения определяется произведением функций, описывающих ФП анализаторов первого и второго порядка (см. Заключение).

Так, в приборе контроля качества изображения системы по виду изображения точки роль МА-1 выполняет точечная диафрагма, которая вместе с исследуемой системой полностью определяет структуру изображения точки. Техническая реализация МА-2 основывается на включении в структуру прибора оптического контроля соответствующего модуля, обеспечивающего требуемую аналоговую или цифровую обработку оптического сигнала. Обобщенная функциональная схема модуля МА-2, как правило, включает в себя следующие элементы:

- 1) приемник изображения,
- 2) систему обработки видеосигнала,
- 3) устройство отображения информации.

Например, фотоматериал, используемый в соответствующем режиме экспонирования и фотографической обработки, может выполнять функции МА-2, совмещая в себе все три перечисленные функции. Достоинствами такого решения являются конструктивная простота и высокая

геометрическая точность отображения (10-15 мкм на фотопленке и менее 1 мкм на фотопластинке). Недостаток - невысокая оперативность получения данных и расход дефицитного серебра. Поэтому развитие устройств для реализации МА-2 чаще основывается на использовании сканирующих приемников, электронных блоков обработки сигнала и компьютеров.

ТИПОВЫЕ УЗЛЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Коллиматор

Этот прибор состоит из объектива и тест-объекта, расположенного в задней фокальной плоскости. С помощью коллиматора можно получить параллельный пучок лучей, выходящих из объектива коллиматора (рис. 6), если в заднем фокусе его расположить непрозрачный экран с малым отверстием в центре (так называемую «точку» или точечную диафрагму), или изображение другого тест-объекта, расположенное на бесконечном расстоянии от объектива.

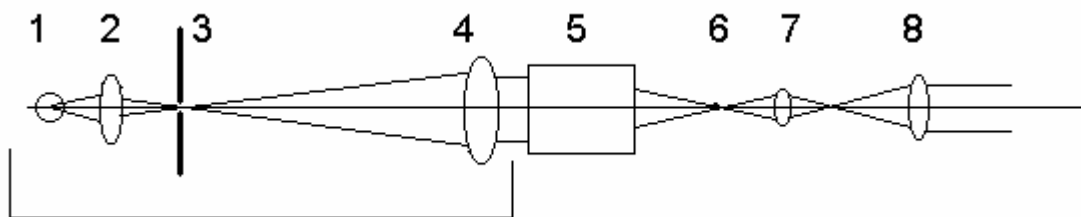


Рис. 6. Коллиматор (в составе схемы исследования объектива)

1 – лампа, 2 – конденсор, 3 – тест-объект, 4 – объектив коллиматора, 5 – исследуемый объектив, 6 – изображение тест-объекта, 7 - 8 - наблюдательный микроскоп

Объектив коллиматора дает мнимое изображение в бесконечности позади себя и действительное изображение в бесконечности впереди себя. Основное функциональное назначение коллиматора заключается в создании высококачественного бесконечно удалённого изображения какого-либо тест-объекта. Для угловых измерений и измерения аберраций используют щель или точку, а при измерении характеристик оптических систем – сетки и штриховые миры. С целью расширения возможностей коллиматора сетку помещают в выдвигающийся тубус, имеющий шкалу для отсчёта перемещения относительно нониуса. При установке такого коллиматора на бесконечность записывают соответствующий отсчёт m_{∞} по шкале и используют его в дальнейшем.

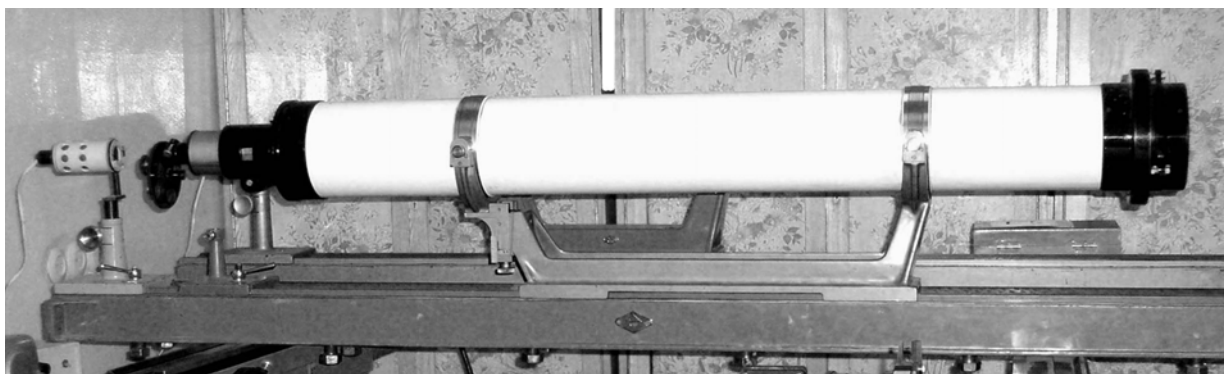


Рис. 7. Коллиматор, общий вид

Наиболее важным элементом коллиматора является объектив, роль которого могут выполнять простые линзы, двухлинзовые объективы, сферические и параболические зеркала.

Традиционно принято, что остаточная волновая aberrация объектива коллиматора, как правило, не должна превышать четверти длины волны света ($0,25 \lambda$ - критерий Рэлея) [3]. С другой стороны, для количественных оценок характеристик качества изображения исследуемой оптической системы необходимо, чтобы погрешности объектива коллиматора были на порядок меньше ошибок и aberrаций исследуемого объектива. С этой точки зрения коллиматорный объектив, соответствующий критерию Рэлея, пригоден в основном для измерения характеристик фотографических (а также телевизионных и видео-) объективов, допустимые расчетные aberrации которых как раз и находятся на уровне $2 - 2,5 \lambda$. Что касается объективов зрительных труб, обязанных иметь дифракционное качество изображения ($0,5 - 0,25 \lambda$), то здесь требования к коллиматорному объективу - $0,05 - 0,03$, но не хуже $0,1 \lambda$. Как проконтролировать изделия с таким качеством при их изготовлении – показано результатами современных исследований [10] и будет рассмотрено в последующих частях данного пособия.

Двухлинзовые объективы коллиматоров, склеенные или с воздушным промежутком между линзами, имеют значительно более широкие диапазоны фокусных расстояний и относительных отверстий, чем простые линзы. Диаметры объективов, склеенных из двух линз, как правило, не превышают 150 мм. Двухлинзовые объективы с воздушным промежутком между линзами имеют световые диаметры 100 - 300 мм. Относительные отверстия двухлинзовых объективов коллиматоров лежат в пределах 1:5 - 1:12. Заключение о возможности использования линзового объектива в роли объектива коллиматора принимается в каждом конкретном случае на основании рассмотрения его aberrационных характеристик и требований к качеству коллиматора.

В качестве коллиматора может быть использовано параболическое зеркало, создающее идеально плоский волновой фронт при расположении

точечного источника света в фокусе параболоида с любым относительным отверстием. Это свойство часто используют для устранения центрального экранирования, располагая источник света в заднем фокусе F' параболоида. Однако изготовление высококачественного параболического зеркала - более трудоёмкая задача, чем изготовление сферического зеркала. Параболические зеркала в роли объективов коллиматоров в основном используют для инфракрасной области спектра, где длина волны сравнительно велика, поэтому требования к точности изготовления зеркала сравнительно невысокие.

Сферическое вогнутое зеркало, используемое иногда в качестве объектива коллиматора, имеет, как правило, сравнительно большие диаметры (свыше 300 мм). Главное преимущество такого объектива заключается в сравнительно простой конструкции и в полном отсутствии хроматических аберраций; основной недостаток – в наличии центрального экранирования и остаточных расчётных аберрациях, из-за чего такие коллиматоры имеют существенное ограничение в части относительного отверстия. Устранение этих недостатков путём введения дополнительных оптических элементов приводит к увеличению световых потерь.

Чтобы на точность измерений меньше влияла неточность установки коллиматора на бесконечность (ΔX_k), аберрации его объектива, неточность деления шкалы сетки, необходимо, чтобы [2]

$$f'_k \geq (3 \div 5)f'_u,$$

где f'_k и f'_u – фокусные расстояния объективов коллиматора и испытываемой системы.

Это вытекает из зависимости :

$$\Delta X'_n = \Delta X'_k \left(\frac{f'_u}{f'_k} \right)^2$$

полученной из формулы отрезков (Ньютона).

У двухкомпонентных объективов довольно большой вторичный спектр, поэтому при измерении или испытании длиннофокусных систем, когда его влияние особенно сказывается, следует использовать светофильтры. Устанавливать коллиматор на бесконечность надо при том же светофильтре.

Угловая γ и линейная k цена деления сетки коллиматора связаны соотношением

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{k}{f'_k}$$

Расчёт шкалы сетки ведут по формуле [2]:

$$k_i = f_k' [\operatorname{tg} i \gamma - \operatorname{tg} (i-1) \gamma],$$

где i – номер деления.

Выбор ширины штрихов зависит от f_k' и характеристик последующей оптической схемы.

Измерительный микроскоп

Микроскопы (рис. 8) в измерительных приборах делятся на **визирные**, служащие для совмещения визирных сеток с заданными точками измеряемого объекта, расположенного на близком расстоянии (в предметной плоскости), и **отсчетные** – для точного отсчета по шкалам.

Микроскоп состоит из двух основных узлов: объектива и окуляра. Расстояние Δ между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра называется оптическим интервалом микроскопа.

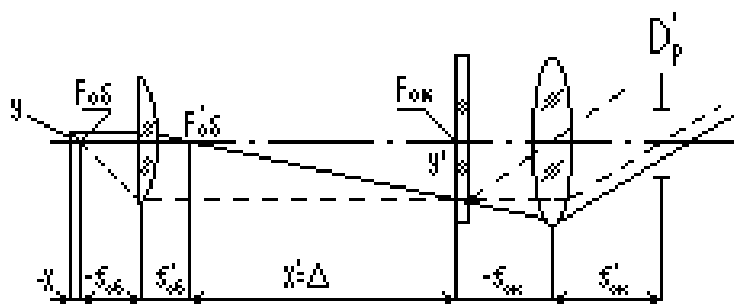


Рис. 8. Принципиальная схема измерительного микроскопа

Линейное увеличение объектива $V_{об}$ и видимое увеличение окуляра $\Gamma_{ок}$ находят по формулам:

$$V_{об} = \frac{\Delta}{f'_{об}} = \frac{y'}{y}$$

$$\Gamma_{ок} = 250/f'_{ок}$$

Видимое увеличение всего микроскопа:

$$\Gamma_M = \frac{250}{f'_M} = V_{об} \cdot \Gamma_{ок}$$

В измерительных микроскопах используются объективы с небольшими апертурами, имеющие большее рабочее расстояние. Увеличение микроскопа можно изменить путем замены объектива или окуляра. (Можно изменить увеличение микроскопа и изменением длины тубуса, однако необходимо иметь в виду изменение при этом расчетных aberrаций микрообъектива).

Пределы увеличения микроскопов в измерительных приборах составляют:

$$1000A \geq \Gamma_M \geq 250A .$$

где A – числовая апертура объектива микроскопа.

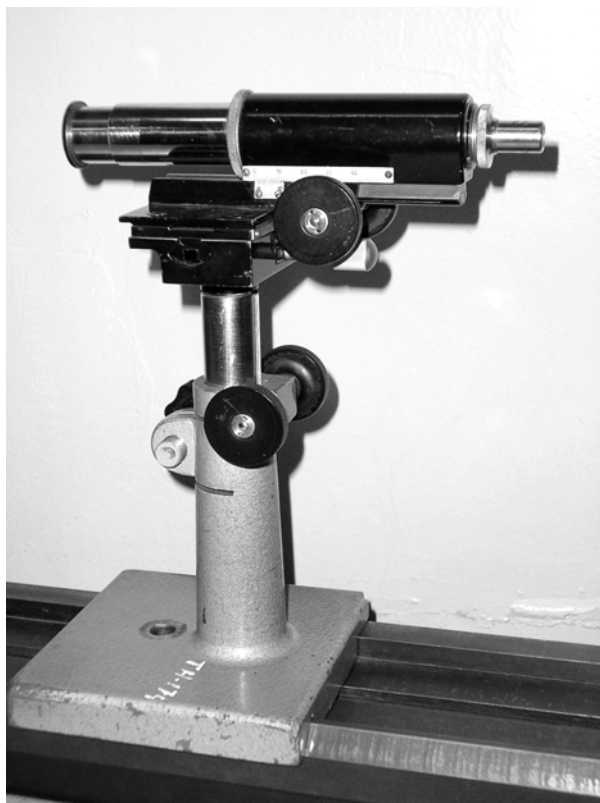


Рис. 9. Визирный измерительный микроскоп

Увеличение $1000A$ является предельным полезным увеличением микроскопа.

Линейное поле зрения $2y$ (или D_A) зависит от размера полевой диафрагмы окуляра D_{Π} и увеличения $V_{об}$.

$$2y = \frac{D_{\Pi}}{V_{об}}$$

Чаще всего $D_{\Pi} = 8 - 18 \text{ мм}$. Периферия поля зрения используется для обнаружения объекта, изображение которого затем приводится в центр.

Глубину резкости микроскопа, исходя из размера дифракционного кружка рассеяния на сетчатке глаза, определяют по формуле [2]:

$$T \cong \frac{\lambda}{2A^2}$$

Визирные микроскопы должны иметь сетку с перекрестием (или штрихами другой формы в зависимости от особенностей объекта измерения).



Рис. 10. Отсчетный измерительный микроскоп (в составе кольцевого сферометра)

Отсчетные микроскопы в простейшем случае, когда отсчетное устройство находится вне микроскопа (шкала и нониус) служат только для создания увеличения. Чаще микроскоп содержит на сетке устройство для отсчета по шкале, находящейся вне прибора. Таким устройством может быть индекс или шкала между штрихами в изображении основной шкалы. Последняя служит для оценки долей деления с повышенной точностью. Микроскопы для наиболее точных отсчетов содержат окулярные микрометры сложных конструкций.

Ширина штрихов сеток рассчитывается аналогично сеткам зрительных труб. Так как задняя апертура объектива микроскопа обычно равна 0.02, то ширина штрихов не может быть менее 0.02мм.

Величина интервалов между штрихами рассчитывается исходя из заданной цены деления, отнесенной к пространству предметов. Так

например, если требуется цена деления на предмете $C=0.005\text{мм}$, а увеличение объектива $V_{об}=3.7^x$, то расстояние между штрихами сетки должно быть $C' = C \cdot V_{об} = 0.018\text{мм}$.

В отсчетных микроскопах приборов выявляют ошибки типа “рэн”-отступление увеличения микрообъектива от номинального. Наиболее надежным способом определения реального увеличения объектива является измерение изображения заданного отрезка, отложенного по шкале объект-микрометра.

Зрительная труба

Зрительная труба – это визуальное устройство для наведения на бесконечно удаленные объекты. Наблюдательные или телескопические приборы служат, в основном, для рассматривания удаленных от наблюдателя предметов в увеличенном виде. Параллельный пучок, попадающий в телескопическую систему, выходит из нее параллельным. Это соответствует условию работы визуального прибора. Для компенсации аметропии глаза в телескопической системе предусмотрено диоптрийное перемещение окуляра.

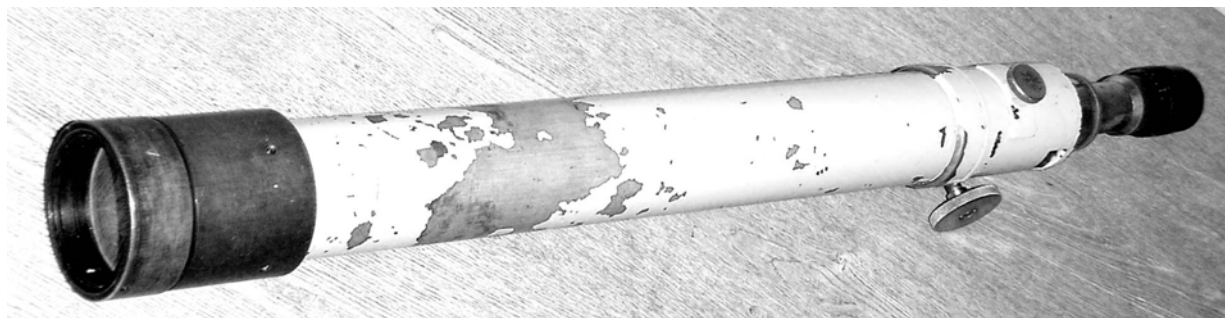


Рис. 11. Измерительная зрительная труба

Зрительная труба может быть выполнена по схеме Галилея или Кеплера.

Труба по схеме Галилея состоит из объектива и отрицательного окуляра. Применение таких схем для оптических измерений ограничено. Это объясняется тем, что в системе Галилея промежуточное изображение предмета мнимое и не может быть совмещено с отсчетным устройством, например – со шкалой. Зрительная труба Галилея используется, например, в осветительных системах лазерных устройств, для исключения фокусировки лазерного излучения, что связано с опасной концентрацией энергии.

Зрительная труба по схеме Кеплера состоит из объектива и положительного окуляра. Основное преимущество схемы Кеплера заключается в том, что она обеспечивает действительное изображение предмета, в плоскости которого можно установить сетку (шкалу). Зрительная труба с сеткой обладает полезным качеством. У нее между главной точкой объектива и центром перекрестия на сетке образуется

прямая, которая служит визирной линией. Если наблюдаемый предмет совместить с перекрестием, то есть с визирной линией, то это позволит определить его истинное направление относительно глаза наблюдателя. Такие приборы называются визирами. В визирах точность наведения или точность визирования зависит от фокусного расстояния объектива, типа шкалы сетки и формы предмета. В среднем ошибка наведения составляет 10 – 15″.

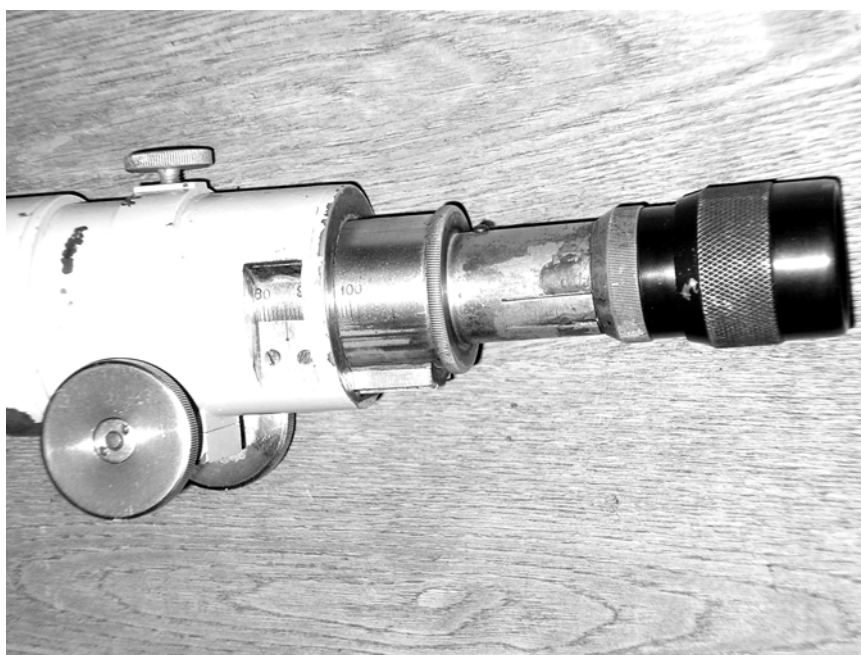


Рис. 12. Окулярная часть измерительной зрительной трубы

Собственно зрительная труба (рис.11, рис.12) имеет цилиндрический корпус, в котором с одной стороны закреплен объектив в оправе, а с другой – окуляр с сеткой. Для диоптрийного перемещения окуляра используется специальная окулярная резьба.

Основными оптическими характеристиками зрительной трубы являются: видимое увеличение Γ_t , угол поля зрения 2ω и диаметр входного зрачка D . Входным зрачком простейшей зрительной трубы является диаметр объектива, а выходным зрачком – его изображение, построенное окуляром. Для измерительных зрительных труб размер выходного зрачка находится в пределах

$$0,5 \text{ мм} < D' < 2 \text{ мм}.$$

При таких зрачках, согласованных с диаметром глазного зрачка, глаз дает наименьшую погрешность наведения.

Под видимым увеличением понимают отношение тангенса угла ω' , под которым наблюдается параксиальное изображение предмета, к тангенсу угла ω , под которым тот же предмет наблюдается невооруженным глазом.

Если предмет расположен в бесконечности, то видимое увеличение Γ равно угловому увеличению γ :

$$\Gamma = \operatorname{tg} \omega' / \operatorname{tg} \omega = \gamma = 1 / \beta$$

Линейное увеличение β связано с продольным увеличением α зависимостью:

$$\beta^2 = \alpha = (f'_{\text{ок}} / f'_{\text{об}})^2,$$

где $f'_{\text{ок}}$ и $f'_{\text{об}}$ – соответственно фокусные расстояния объектива и окуляра.

В свою очередь, линейное увеличение:

$$\beta = f'_{\text{ок}} / f'_{\text{об}} = D' / D$$

Из этого соотношения следует, что для определения линейного или углового увеличения зрительной трубы достаточно знать фокусные расстояния объектива и окуляра или диаметры входного D и выходного D' зрачков. Обычно фокусное расстояние окуляра выбирается не ниже определенного предела (около 10 мм), поэтому большие увеличения зрительных труб получают применением объективов с достаточно большими фокусными расстояниями. Оптимальное значение увеличения измерительной зрительной трубы изменяется в пределах:

$$0,5D < \Gamma < 2D.$$

Угловое поле 2ω телескопической системы – это удвоенный угол, под которым из центра входного зрачка виден диаметр полевой диафрагмы, расположенной в общей фокальной плоскости объектива и окуляра:

$$\operatorname{tg} \omega = D_{\text{пд}} / 2f'_{\text{об}},$$

где $D_{\text{пд}}$ – диаметр полевой диафрагмы; $f'_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива. Угловое поле зрительной трубы обычно невелико:

$$2\omega < 5^\circ.$$

Относительным отверстием объектива зрительной трубы называется отношение диаметра его входного зрачка к фокусному расстоянию. В трубах, используемых в измерительных приборах, это отношение лежит в пределах от 1:5 до 1:15. В большинстве случаев объективы зрительных труб представляют собой сравнительно простые системы из двух линз (положительной и отрицательной), которые склеены между собой или (у объективов значительного диаметра) разделены малым воздушным зазором.

Важной характеристикой измерительных приборов являются пределы измерения – наибольшее и наименьшее значения измеряемой величины. В оптических измерениях используют поперечное и продольное наведения (установки) перекрестия на шкалу, марку или контролируемый объект с последующим снятием отсчетов. Каждое наведение сопровождается погрешностями поперечной и продольной установок, величина которых

зависит от многих факторов, и если влияние aberrаций, рассеянного света и других конструктивных недостатков на точность установки можно свести до минимума или устранить полностью, то действие дифракции неизбежно. Дифракция света ограничивает разрешающую способность оптической системы (см., например, Часть 2 настоящего пособия) [11].

Разрешающей способностью зрительной трубы называют то наименьшее угловое расстояние ψ между двумя удаленными точками, при котором эти точки еще видны раздельно. Теоретический предел разрешающей способности определяется диаметром входного зрачка объектива D .

Согласно критерию Рэлея и при длине волны $\lambda = 0,55$ мкм имеем:

$$\psi = 120'' / D.$$

Разрешающую способность оптических систем традиционно определяют с помощью штриховых или радиальных миш, представляющих собой стеклянные пластинки с нанесенными светлыми штрихами или секторами на темном фоне.

Кроме того, на точность поперечной и продольной установки влияет способ наведения, который зависит от формы наблюдаемого объекта или марки прибора. Поперечную установку зрительной трубы чаще всего производят на удаленный предмет, поворачивая или наклоняя трубу, при этом ошибка установки выражается в угловой мере. Точность наведения на практике находят по формуле:

$$\xi'' = \varphi_{\text{гл}} / \Gamma,$$

где $\varphi_{\text{гл}}$ – острота зрения.

Продольную установку или фокусировку зрительной трубы производят обычно перемещением окуляра, причем предполагается, что он предварительно установлен на резкое видение нитей окулярной сетки.

В объективах телескопических систем особое внимание обращают на такие aberrации, как сферическая, хроматическая и астигматизм на оси. Другими aberrациями, например кривизной поля изображения и дисторсией обычно пренебрегают при малом поле изображения.

Автоколлимационная зрительная труба

Автоколлимационная зрительная труба является сочетанием зрительной трубы и коллиматора. Освещенный предмет сопряжен с фокальной плоскостью окуляра трубы. Чтобы получить автоколлимационное изображение этого предмета в плоскости сетки окуляра, перед объективом необходимо на произвольном расстоянии поместить зеркально отражающую плоскую поверхность (рис.13).

В основном автоколлиматоры используются для измерения угла φ поворота автоколлимационного зеркала, связанного с измеряемым объектом.

	Рис.13
	Рис. 14
	Рис. 15

Угол φ определяется по смещению a автоколлимационного изображения на сетке прибора:

$$a = 2f'_{об} \operatorname{tg} \varphi.$$

где $f'_{об}$ - фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

Выбирая длину плеча оптического рычага, равную $2f'_{об}$, можно получить в поле зрения значительное смещение изображения при небольшом угле φ .

Для фокусировки автоколлиматора на бесконечность используется подвижный окулярный или объективный тубус. Так как свет дважды проходит через объектив, то требования к качеству изображения, создаваемого объективом при автоколлимации, в 2 раза строже, чем у обычной зрительной трубы.

Автоколлиматоры могут иметь автоколлимационное устройство, вмонтированное внутрь прибора, или съемный автоколлимационный окуляр, который позволяет превратить коллиматор в автоколлиматор.

Можно превратить в автоколлиматор и любую зрительную трубу, но необходимо помнить указанное требование в аберрациям объектива. Поле зрения, увеличение и способ отсчета автоколлиматора зависят от типа и конструкции автоколлимационного устройства и окулярного микрометра.

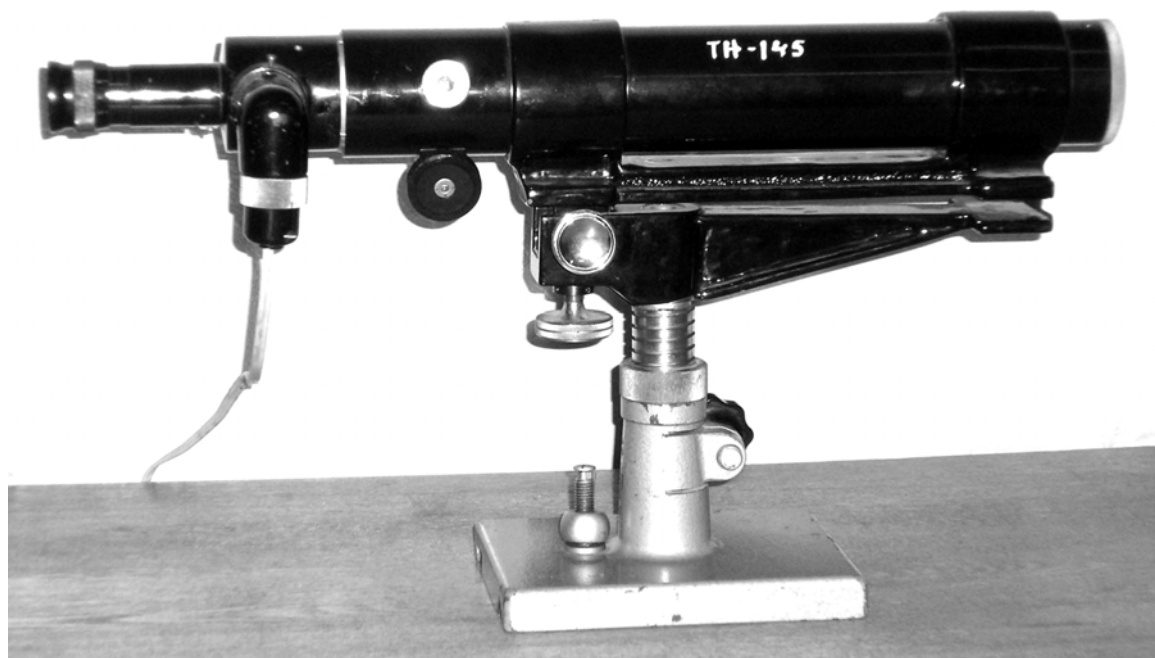


Рис. 16. Автоколлиматор

Автоколлимационный микроскоп

В основу автоколлимационных методов измерений положено формирование светового пучка в прямом и обратном ходе (посылаемого на измеряемый объект и возвращенного) одним объективом.

Широкое применение для решения важных практических задач, например для измерения радиусов сферических поверхностей, получили автоколлимационные микроскопы. Принципиальная схема такого прибора представлена на рис. 14 .

Автоколлимационный окуляр 2 устанавливают вместо окуляра микроскопа так, чтобы фокальная плоскость окуляра совместилась с плоскостью изображения объектива 3. Если действительное изображение A' перекрестия A совместить с центром кривизны C сферической отражающей поверхности 4, то лучи света после отражения от поверхности 4 поступают в глаз 1 наблюдателя. В плоскости изображения видно перекрестие A и совмещенное с ним автоколлимационное изображение A' (аналогично плоскости изображения в автоколлимационной зрительной трубе). Таким образом, совмещение перекрестий A и A' является признаком того, что предметная точка микроскопа совместилась с центром кривизны сферической поверхности или с ее вершиной. Если точка A' смещена от точки C в поперечном направлении на расстояние Δ_y , то

автоколлимационное изображение перекрестия в фокальной плоскости окуляра сместится относительно точки А на расстояние:

$$\Delta'_y = \Delta_y \beta,$$

где β – линейное увеличение объектива микроскопа.



Рис. 17. Автоколлимационный микроскоп

Одним из основных элементов автоколлимационных приборов, и, в частности, микроскопа, является автоколлимационный окуляр, главное назначение которого состоит в формировании световой марки и создании необходимого увеличения для наблюдений её автоколлимационного изображения в плоскости сетки. Для этого автоколлимационные окуляры снабжаются светоделительными устройствами в виде полупрозрачных пластинок, светоделительных призм-кубиков или светоделителей других видов.

Автоколлимационный микроскоп может быть использован для определения радиусов кривизны сферических поверхностей автоколлимационным способом. В частности, автоколлимационный

микроскоп применяют со сменными объективами для измерения малых радиусов кривизны (от 1 до 100 мм).

На рис. 15 показана схема автоколлимационного микроскопа с контролируемой линзой 1, имеющей сферическую поверхность.

Измерение радиуса кривизны вогнутой или выпуклой сферической поверхности сводится к получению двух изображений: первого – от самой поверхности линзы и второго – от центра кривизны поверхности линзы, для чего требуется изменить расстояние между поверхностью и микроскопом.

Разность отсчетов для этих двух положений и составит величину радиуса кривизны. Если микроскоп снабжен измерительным винтом, то радиус кривизны можно измерить с погрешностью ± 0.01 мм. Пучок лучей от источника через осветительную призму 4 освещает марку, нанесенную на окулярную сетку 3 под призмой. От марки пучок лучей направляется через объектив 2 микроскопа на контролируемую поверхность линзы 1. При положении I линзы в поле зрения окуляра 5 наблюдают автоколлимационное изображение марки, образованное отраженным пучком лучей из центра кривизны поверхности, при положении II – от поверхности линзы. Измерение радиуса кривизны *выпуклых* сферических поверхностей ограничивается рабочим расстоянием от предметной плоскости микроскопа до первой поверхности фронтальной линзы объектива. Поэтому, в зависимости от размера радиуса кривизны, требуется каждый раз подбирать соответствующий объектив. Для измерения радиусов кривизны *вогнутых* сферических поверхностей такого подбора не требуется.

Точность фокусировки микроскопа на поверхность детали и в центр кривизны определяют в зависимости от чувствительности продольной наводки, то есть от действующей числовой апертуры рабочего пучка лучей [2]:

$$\sin\sigma = D / (2r),$$

где D – диаметр измеряемой детали, r – радиус кривизны.

В целях повышения чувствительности наводки выбирают микрообъектив с апертурой, близкой к вычисленному значению. Погрешность измерения радиуса, обусловленная только чувствительностью продольной наводки, принято определять по формуле:

$$\Delta r \approx 0,8(r / D)^2.$$

Пути применения вычислительной техники в оптическом приборостроении и контроле

Назовем основные направления:

1. Автоматизированный расчет и проектирование оптических систем, приборов, технологических процессов.

2. Управление технологическими процессами производства оптических деталей, систем и приборов.
3. Автоматизированная обработка результатов оптического контроля и измерений.
4. Управление процессами оптического производственного контроля и измерений.
5. Активные системы оптического контроля в гибких системах производства оптических приборов.
6. Управление работой автоматизированных оптических приборов и обработка информации на выходе приборов.
7. Включение оптических систем, процессоров и элементов связи в конструкции электронно – вычислительных машин.

Автоматизация расчета и проектирования систем начала свое развитие с появлением ЭВМ в 40-х годах нашего столетия и в наши дни получает все более широкое распространение, в том числе и в условиях действующего оптического производства. Наряду с вопросами автоматизации проектирования, выполняются задачи расчетной оценки качества изображения и аберраций 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 ЭВМ 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, то есть технологичность оптической конструкции. Рассматривая применение компьютера в области оптического производственного контроля, 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, гартманограмм); 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 гибкой производственной системы (ГПС);
- обработка данных и получение рекомендаций на юстировочные воздействия в операциях автоматизированной юстировки;
- контроль и аттестация готовых оптических систем и приборов.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Общие сведения

Прибор для линейных измерений имеет элемент, хранящий единицу длины (его условно принято именовать эталоном) [12]. В качестве эталонов применяются шкалы (штриховые меры), микрометрические винты, концевые меры длины, иногда - длина волны света и скорость света. Скорость света используется в светодальномерах, а длина волны света - в интерферометрах. Так как длина волны имеет очень малую величину, то даже в пределах очень небольшой измеряемой длины уложится огромное число интерференционных полос, которые трудно сосчитать. Для этой цели применяются автоматические фотоэлектрические счетчики полос.

Шкалы позволяют при поддержании постоянной температуры измерять с высокой точностью длины в несколько метров, так как погрешность изготовления самих шкал может не превышать 0,1 мкм на 200 мм, но для точного отсчета по шкале необходим микроскоп ($\Gamma_m = 200-400^x$). Микрометрический винт не требует дополнительного увеличения, так как сам обладает значительным масштабом шкалы:

$$M = \frac{\pi d}{t}.$$

Если шаг винта $t = 0,5$ мм, диаметр барабана шкалы $d = 60$ мм, то $M = 400^x$. Такой винт заменяет шкалу с отсчетным микроскопом с $\Gamma_m = 400^x$, что удобно для цеховых приборов. На точность отсчета мало влияют температурные колебания.

Концевые меры позволяют получать высокую точность, так как сами изготавливаются очень точно и имеют строгую определенность краевых точек. С их применением допускается использование простых измерительных приборов с малыми пределами отсчетных шкал.

Основное требование, предъявляемое к точным приборам для линейных измерений, заключается в том, чтобы определяемая величина была расположена на одной оси со шкалой или являлась продолжением этой шкалы (принцип компарирования). При этом исключаются ошибки, вызванные непрямолинейностью направляющих, наличием люфтов и т.д.

В кольцевом сферометре (см. Часть 1), как и в компараторах (рис. 18), принцип компарирования соблюдается. Измерительный стержень, перемещающийся на величину измеряемой стрелки прогиба, несет на себе отсчетную шкалу.

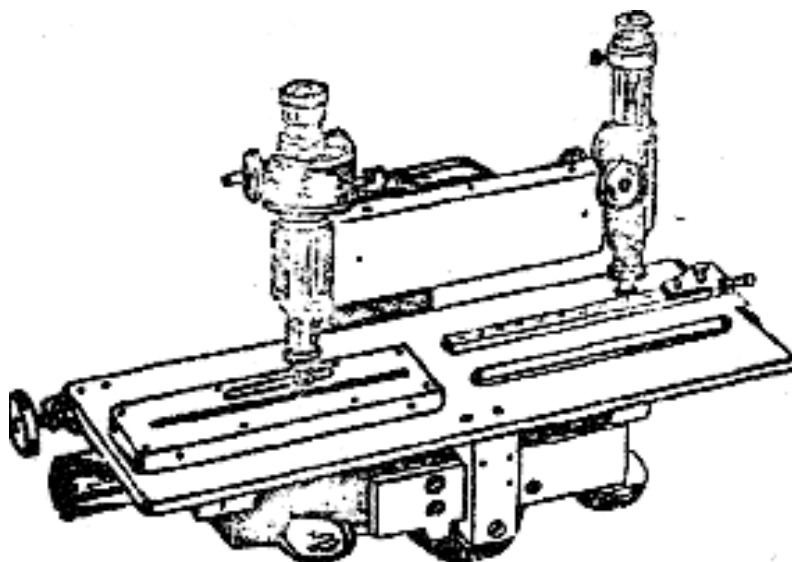


Рис.18. Измерительный микроскоп - компаратор

В наиболее точных компараторах измеряемая деталь и шкала помещаются на подвижном столе друг за другом. При перемещении стола один из двух микроскопов визируют на края измеряемого размера детали, а с помощью второго берут отсчеты по шкале. Прибор имеет ошибки измерения δ второго порядка малости от перекосов φ в направляющих

$$\delta = L \frac{\varphi^2}{2},$$

где L - измеряемая величина.

При измерении поперечных размеров изображения предметов, в поле зрения прибора возникают ошибки от неточной фокусировки, так как при этом меняется измеряемый размер в изображении предмета, поэтому измерительные приборы, служащие для этих целей, должны иметь телецентрический ход лучей в том пространстве, где производится фокусировка. При этом главные лучи наклонных пучков идут параллельно оптической оси, и измеренный размер изображения не будет меняться от перефокусировки.

Измерение толщин линз, воздушных промежутков и линейных размеров деталей

Отклонение толщин линз и воздушных промежутков между линзами от расчетных величин вызывает ухудшение качества изображения. Особенно жесткие допуски - для широкоугольных систем, например, аэрофотообъективов. В зависимости от условий работы системы допусков на толщины линз колеблются от ± 0.1 мм до нескольких мкм. При допуске 0,1 мм требуется последующая комплектация линз системы

по толщине до сотых долей миллиметра. Таким образом, получаемая точность измерения толщин составляет сотые и тысячные доли миллиметра.

В настоящее время заводской контроль толщин линз чаще всего осуществляется контактными толщемерами с механическим или оптическим отсчетным устройством. Таким образом, методы определения толщин линз не отличаются от методов измерения механических деталей, но требуют лишь центрировки линзы, обеспечивающей измерение вдоль оптической оси, и осторожного обращения с поверхностям. Точность указанных методов 0,1-0,002 мм.

Принцип действия оптико-механического длинномера аналогичен действию кольцевого сферометра. Деталь устанавливается на столик прибора, и измерительный стержень опускается до соприкосновения с её поверхностью. Отсчет производится с помощью микроскопа с окулярным микрометром по шкале, которую имеет измерительный стержень. Второй отсчет берется при установке измерительного стержня на образцовую деталь (относительные измерения) или на столик (абсолютные измерения). Приборы обеспечивают высокую точность измерения - погрешность не превышает 1,5 мкм; они имеют широкие пределы измерения - до 250 мм. Основные ошибки прибора возникают за счет неточности изготовления направляющих перемещения измерительного стержня и неточности делений шкалы (в отсчет необходимо вносить поправки). Проверка производится по числу делений окулярного микрометра, соответствующих одному делению шкалы.

Недостатком контактных методов является возможность повреждений (появления царапин) на поверхности детали. В настоящее время разработаны и бесконтактные методы контроля толщин с высокой точностью. Бесконтактным является толщемер, основанный на использовании двух автоколлимационных микроскопов, расстояние между объективами которых может изменяться.

Измерение состоит из двух операций:

1) Перед измерением подвижный микроскоп устанавливают так, чтобы предметные точки совпали. В поле зрения должно наблюдаться резкое изображение сетки другого микроскопа. Берут отсчет по шкале перемещения.

2) Между микроскопами помещают контролируемую деталь так, чтобы предметные точки микроскопов совпали с поверхностью детали, обращенной к данному микроскопу, при этом в том и другом поле зрения (в плоскости сетки) будут наблюдаться резкие автоколлимационные изображения от соответствующей поверхности детали. Берут второй отсчет. Разность отсчетов дает толщину детали.

Точность метода ограничивается чувствительностью продольных

наводок [2]: $\Delta d = 2\Delta z = 2 \frac{0.2}{u^2}, \text{ мкм.}$

При достаточно больших передних апертурах и точных направляющих можно получить Δd порядка 0,002 мм.

Ведутся работы по автоматизации методов контроля толщин линз. Созданы автоматические и полуавтоматические устройства для бесконтактного контроля на поточных линиях.

Контроль воздушных промежутков производится путем расчета размерной цепи (рис.19).

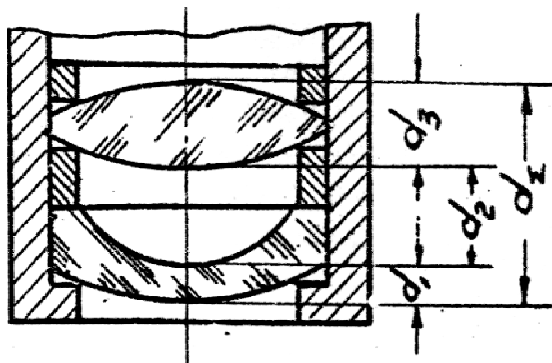


Рис. 19

Перед сборкой измеряются толщины d_1 и d_3 , после сборки - d_Σ , тогда воздушный промежуток можно вычислить по формуле

$$d_2 = d_\Sigma - (d_1 + d_3).$$

Так как ошибки суммируются, то толщины должны измеряться с лучшей точностью, чем заданная точность определения d_2 .

Оптические методы измерения других линейных размеров деталей аналогичны показанным. Кроме длинномеров используются оптиметры, инструментальные измерительные микроскопы, универсальные измерительные микроскопы, компараторы. Процессы измерения во всех случаях аналогичны рассмотренным выше для компаратора и длинномера.

Методы измерения малых линейных размеров - измерение поперечных размеров в поле зрения микроскопа

Измерение малых поперечных размеров деталей, не превышающих поля зрения микроскопа, осуществляется чаще всего с помощью винтовых окулярных микрометров и окуляров с сеткой или шкалой. Иногда применяют специальные оптические микрометры двойного изображения, в которых наводка на каждый край измеряемого размера осуществляется по совмещению двух изображений этого края. Отсчеты производятся с помощью микрометрического устройства, перемещающего измерительный элемент микроскопа. Наиболее грубым является измерение по шкале в поле зрения, так как доля деления здесь оценивается на глаз. Этот метод применяется в основном при

разбраковке, когда на сетке указывается поле допуска. Перед измерением с любым отсчетным устройством устанавливается цена деления K шкалы, отнесенная к пространству предметов. Микроскоп фокусируют на резкое изображение объект-микрометра (очень мелкая шкала, состоящая из 100 делений с ценой деления 0,01 мм) и определяют, сколько делений m_1 в изображении объект-микрометра соответствует определенному числу делений m_2 окулярного микрометра.

$$K = \frac{0.01m_1}{m_2}.$$

Точность метода измерений при телецентрическом ходе лучей в пространстве предметов ограничивается чувствительностью поперечных наводок, определяемой по формуле [2]:

$$\Delta\varphi = 2T = \frac{0.34}{u}, \text{ мкм.}$$

Методы измерения толщины тонких пленок

Тонкие пленки на поверхностях деталей широко используются в оптико-механическом производстве, полупроводниковой промышленности, при изготовлении квантовых генераторов и т.д. Толщины пленок колеблются от 0,5 мм до $5 \cdot 10^{-6}$ мм, коэффициент отражения - от 0,99 до 0,005, показатели преломления вещества пленок также различны. Пленки могут быть металлическими, полупроводниковыми и диэлектрическими, прозрачными и непрозрачными.

На свойства пленок влияет структура подложки, чистота, шероховатость и качество её поверхности, так как пленки обычно повторяют рельеф подложки. Так, например, пленка серебра толщиной в несколько сот ангстрем повторяет неровности подложки высотой в несколько ангстрем. Точно измерить толщину пленки можно только в том случае, если шероховатость подложки меньше допустимой погрешности измерения.

Для измерения толщины пленок обычно используются не сами детали, а "свидетели" - специальные пластинки, на которые наносятся пленки в тех же условиях. Если пленка непрозрачна, а в некоторых случаях также и при исследовании прозрачных пленках, на образце делается "ступенька" (часть поверхности остается без пленки). Ступеньку можно получить путем экранирования части поверхности при нанесении пленки или вытравливанием канавки специальным реактивом, растворяющим пленку, но не действующим на деталь.

Определение толщины пленки по спектральным кривым отражения или пропускания

Метод пригоден только для контроля прозрачных пленок и основан на интерференционных явлениях, возникающих в тонких слоях. В зависимости от оптической толщины пленки для лучей разных длин волн будут различными условия интерференции. Если получить с помощью спектрофотометра кривую коэффициентов отражения или пропускания, то распределение и величина интерференционных максимумов и минимумов будут однозначно определяться оптической толщиной пленки и показателем преломления. Таким образом, метод позволяет определить не только толщину, но и показатель преломления пленки n_{nl} . Если $n_{nl} > n_o$, где n_o - показатель преломления вещества детали, то используют максимумы кривых, а если $n_{nl} < n_o$, то измеряют минимумы. Измерение кривых производится относительно образца без пленки. Положение экстремальных точек на кривой определяется по формуле

$$\lambda_i = \frac{4n_{nl}h_{nl}}{x},$$

где x - для минимумов принимает значения 1, 3, 5,..., а для максимумов - 2, 4, 6,....

Так как значение x неизвестно, то решают систему из двух уравнений [2]:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{4n_{nl}h_{nl}}{x} \\ \lambda_2 &= \frac{4n_{nl}h_{nl}}{x+1},\end{aligned}$$

Отсюда находят x и $(h_{nl} \cdot n_{nl})$ оптическую толщину пленки.

Для определения показателя преломления пользуются соотношением:

$$\rho_{\min} = \left(\frac{n_{nl}^2 - n_o^2}{n_{nl}^2 + n_o^2} \right)^2,$$

где $\rho_{\min}$ - коэффициент отражения в экстремальной точке, а λ_1 и λ_2 - длины волн, соответствующие выбранным экстремальным точкам.

Точность измерения $\Delta n_{nl} = 0.005$, $\frac{\Delta n_{nl}}{n_{nl}} = 5\%$. Приведенные формулы

справедливы для случая, когда $n_{nl} < n_o$. Несколько измененный метод используется для контроля толщин слоев в процессе их нанесения в вакууме (под колпаком).

Рассчитывают положение и величину минимума кривой отражения или пропускания. Устанавливают монохроматор на эту длину волны и заканчивают напыление в тот момент, когда приемное устройство

покажет именно такой коэффициент. Точность зависит от способа регистрации. В среднем она составляет 2% (при использовании осциллографа).

Измерение толщин пленок с помощью двойного микроскопа

Для измерения толщин пленок могут использоваться методы теневого или светового сечения, к которым относится двойной микроскоп Линника (МИС-11, ПСС-2) [2]. На поверхность образца проецируется изображение освещенной щели шириной 0,04 мм. Изображение щели разрывается на ступеньке и расходится на величину a , которая измеряется с помощью окулярного микрометра. Толщина пленки h находится по формуле

$$h = \frac{a}{V_{об} \sqrt{2}},$$

где $V_{об}$ - увеличение объектива микроскопа.

В случае прозрачных пленок ступенька не нужна, так как в поле зрения получается два изображения щели от поверхности пленки и от поверхности детали. В этом случае:

$$h = \frac{a}{V_{об} \sqrt{2}} \sqrt{2n-1}.$$

Максимальная толщина, которую можно измерить, определяется глубиной резкости используемого микрообъектива $h_{\max} \leq T / \cos 45^\circ$. Минимальная - минимальным расстоянием a , которое можно еще измерить с достаточной точностью. Если принять погрешность 30%, то при объективе с максимальной апертурой $u = 0,5$ имеем $h_{\min} = 0,8$ мкм. Выпускаемые приборы, работающие на этом принципе, позволяют измерять толщины от 720 до 0,8 мкм. При этом для каждого объектива будет свой предел измерения, в середине которого погрешность будет 2%, а на краях - 15 ÷ 30%. В первом случае показатель преломления n , должен быть известен с погрешностью $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$ в зависимости от толщины самой пленки.

Измерение толщины пленки на интерферометре

Большинство пленок имеет толщину от 1 мкм и менее. Необходимую чувствительность при их измерении обеспечивают интерференционные приборы (МИИ-4, МИИ-9, МИИ-15 и МИИ-16). Для прозрачных пленок, снятых с подложки, могут использоваться также интерференционные микроскопы [13].

Для измерения толщины пленки на интерферометре надо иметь ступеньку даже в случае прозрачных пленок, так как в этом случае в интерференции

участвуют пучки, отраженные от поверхности металла как на чистой поверхности, так и на поверхности, покрытой пленкой. Поле зрения выглядит так [2]: видна граница ступеньки, интерференционная картина, разделенная и смещенная на этой границе. Измеряют величину смещения, выражая её в числе интерференционных полос N . Толщина пленки h , находится по формулам

$$h = \frac{N\lambda}{2} \quad (\text{для непрозрачной пленки}),$$

$$h = \frac{N\lambda}{2(n-1)} \quad (\text{для прозрачной пленки}).$$

Верхний предел измерения определяется глубиной резкости объектива $h_{\max} = T$. При апертуре 0,65 это составит 1,1 мкм – 4 полосы.

Нижний предел определяется чувствительностью поперечных наводок, которая при двухлучевой интерференции равна 0,1 интервала, и равен

$$h_{\min} = 0,03 \text{ мкм}.$$

Погрешность измерения колеблется от 8 до 20% в зависимости от измеряемой толщины. Возникает систематическая погрешность от различия скачка фазы при отражении от одной и другой плоскости ступеньки.

Пределы измерения могут расширяться за счет использования специальной аппаратуры. Нижний предел можно расширить за счет использования многолучевой интерференции (интерферометр МИИ-11) до $h_{\min} = 0,003$ мкм при соблюдении строгих условий, обеспечивающих очень узкие и контрастные минимумы. При этом для увеличения числа интерферирующих лучей поверхность образца со ступенькой покрывается отражающим покрытием, например алюминировается.

Дальнейшее повышение точности и чувствительности возможно за счет использования полос равного хроматического порядка при многолучевой интерференции. Погрешность измерения порядка 5 ангстрем.

Измерение шероховатости поверхностей

Для этой цели, кроме профилометров с оптическим рычагом, используются приборы, основанные на методе светового и теневого сечения и микроинтерферометры [2]. В последних двух случаях, как и при контроле толщин пленок, измеряется искривление изображения щели или интерференционных полос на неровностях поверхности.

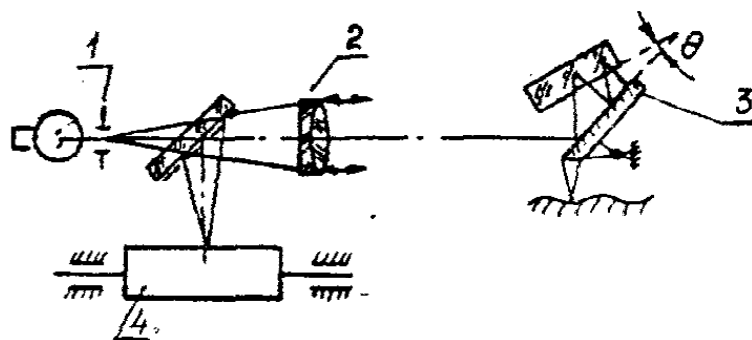


Рис.20

Величина ошибки зависит от формы дна неровности и от апертуры микрообъектива. Для уменьшения вносят поправки в результат изменения. Идея профилографов с оптическим рычагом состоит в том, что ощупывающая алмазная игла соединена с одним из зеркал оптического умножителя, состоящего из двух отражающих пластин, расположенных под углом θ друг к другу. Пучок лучей, идущих от щели 1 к зеркалам, претерпевает многократные отражения, а затем объективом направляется на рулон 4 фотобумаги (рис.20). При вертикальном перемещении иглы зеркало будет поворачиваться, и отклонять луч. Световое пятно на вращающемся рулоне будет отклоняться и выпишет профиль поверхности, увеличенный пропорционально числу отражений и фокусному расстоянию объектива.

Аттестация линейных шкал и сеток оптических приборов

Аттестация шкал производится на компараторе. Испытуемая шкала устанавливается под визирным микроскопом, а образцовая - под отсчетным. Производится сравнение отдельных делений и целых участков шкалы (для выявления накопленной ошибки), составляется таблица поправок в отсчетах. Погрешность измерения 1,5 мкм на длине 200 мм.

Сетки, имеющие шкалы по двум координатам, контролируются на универсальном измерительном микроскопе, столик которого перемещается в двух взаимно-перпендикулярных направлениях с отсчетом по шкалам с помощью двух микроскопов с погрешностью ± 3 мкм на длине 200 мм, или на компараторе измеряют последовательно сначала одно направление, а затем, при повороте детали на 90° , второе.

Методы измерения радиусов кривизны и контроль формы сферических поверхностей

Радиусы кривизны и форма поверхностей должны выдерживаться в процессе шлифовки и полировки оптических поверхностей, так как изменение радиуса кривизны приводит к нарушению коррекции системы, а

местные ошибки вызывают местные деформации волнового фронта, ухудшающие качество изображения.

Допуск на радиус кривизны 0,01-0,5%.

Допуск на местные ошибки - в десять и более раз жестче.

Основные оптические методы контроля радиусов кривизны $R(N)$ и точности формы оптических поверхностей (ΔN) ;

1) метод пробных стекол (цеховой) для контроля местной и общей ошибки поверхности контактным методом;

2) интерферометры с совмещенными ветвями и сферическим эталоном для тех же целей бесконтактным методом;

3) метод колец Ньютона для измерения радиусов кривизны;

4) методы автоколлимации из центра кривизны - измерение радиусов кривизны с помощью автоколлимационного микроскопа или теневым методом ножа.

Контроль методом пробных стекол обладает всеми недостатками, присущими контактному методу. Погрешность измерения - 0,1 шага интерференционной полосы (0,03 мкм).

Измерение при помощи интерферометра Физо (рис.21,а - для выпуклых поверхностей; рис.21б - для вогнутых) выполняется при контроле местных ошибок так же, как и пробными стеклами по искривлению интерференционных полос. Один эталонный сменный мениск 5 может использоваться для контроля поверхностей деталей 6 с разными R , отличающимися на 10 мм. Общую ошибку можно оценить относительным методом по разности числа колец при образцовой и контролируемой детали с одной настройкой прибора. Метод измерения предъявляет строгие требования к жесткости конструкции предметного столика и надежности его подвижек.

При отступлении радиуса кривизны поверхности мениска 5 от контролируемой 6 возникают систематические ошибки из-за клиновидности зазора между поверхностями и ненормального падения света в краевых зонах поверхности. Ошибки тем больше, чем больше различие радиусов кривизны. Другим источником систематических ошибок является искажение интерференционной картины, вызванное тем, что она локализуется на сфере, а наблюдается её проекция на плоскости. Ошибка тем больше, чем круче поверхности. Объектив 4 при контроле выпуклых поверхностей работает в очень тяжелых условиях, так как он должен иметь большой угол охвата для наблюдения всей поверхности и большое свободное расстояние.

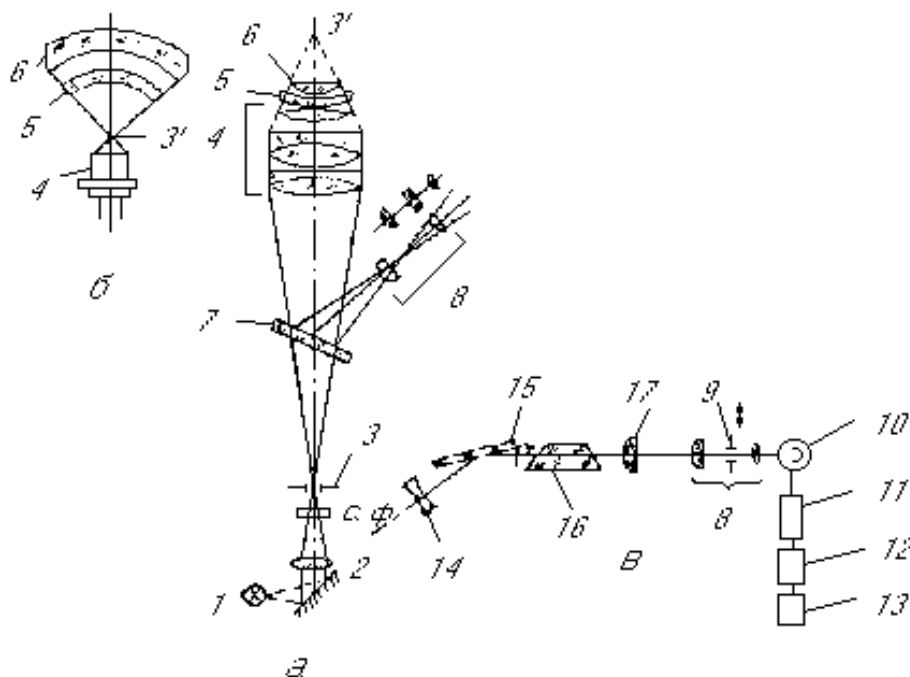


Рис.21

Кольцевой сферометр

Кольцевой сферометр (см. часть 1) позволяет контролировать пробные стекла с R от 37,5 до 750 мм с точностью $\frac{\Delta R}{R} = \pm 0.02\%$ и отдельные поверхности от 10 до 40000 мм с погрешностью 0,04 - 1,5%. Таким образом, кольцевой сферометр дает высокую точность в определенном диапазоне радиусов кривизны.

Механические или контактные методы измерения радиусов кривизны сферических поверхностей линз реализуются индикаторными, стрелочными и кольцевыми сферометрами. При применении индикаторного или кольцевого сферометра измерения сводятся к определению стрелы прогиба h контролируемой поверхности и подсчету радиуса кривизны R по формуле:

$$R = \frac{h}{2} + \frac{r^2}{2h},$$

где r – радиус кольца.

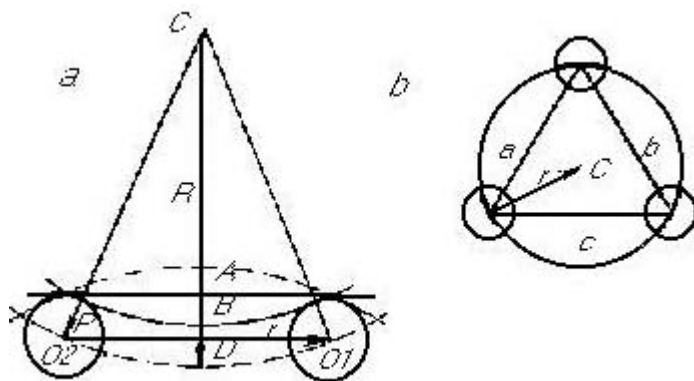


Рис. 22

При измерении стрелки прогиба на кольцевом сферометре ИЗС-7, снабженном кольцами с шариками, радиус кривизны определяется [12] по данным формулам исходя из рассмотрения рис. 22. Здесь R – искомый радиус кривизны выпуклой поверхности, r – радиус кольца и ρ – радиус шарика.

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} - \rho$$

для выпуклой поверхности и

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} + \rho$$

для вогнутой поверхности.

Радиус r кольца с шариками, как и радиусы ρ самих шариков, измеряются на заводе-изготовителе с высокой степенью точности и паспортизуются.

Кольцевой сферометр ИЗС—7 (рис. 22) предназначен для измерения радиусов кривизны выпуклых и вогнутых сферических поверхностей пар пробных стекол с радиусом от 37,5 до 750 мм и отдельных линз и зеркал с радиусом от 10 до 1000 мм. Предельная ошибка измерения равна $\pm 0.02 \%$.

Для обеспечения диапазона измерений радиусов кривизны от 10 до 1000 мм сферометр снабжен набором сменных колец в количестве 7 штук диаметрами 12, 21, 30, 42, 60, 85 и 120 мм. Внутри литого металлического корпуса 6 находится измерительный стержень со стеклянной миллиметровой шкалой длиной 30 мм. Под действием противовеса измерительный стержень поднимается вверх и сферическим наконечником соприкасается с поверхностью контролируемой детали 3.

Для опускания измерительного стержня вниз служит рычаг арретир 5. Отсчет по шкале производится при помощи микроскопа со спиральным окуляр-микрометром 4 с ценой деления 0,001 мм. Увеличение микроскопа $62^{\times}$ в поле зрения 2,3 мм. Измерительная шкала освещается от лампы, включаемой в сеть через трансформатор 7.

До измерения радиуса кривизны поверхности выбирают кольцо 1 диаметром на 5 – 10 мм меньше диаметра контролируемой линзы и насаживают его на верхнюю полированную площадку корпуса сферометра. Соприкасающиеся поверхности кольца и площадки корпуса, а также рабочие поверхности шариков и линзы, должны быть тщательно очищены кисточкой от пыли и загрязнений. На шарики кольца последовательно накладывают контролируемую линзу и плоское стекло (прилагаемое к сферометру) полированной поверхностью к шарикам. Освободив арретир измерительного стержня, следят за его соприкосновением с поверхностью линзы и пластинки. Если контролируемая деталь легка по весу и невелика по диаметру и измерительный стержень выталкивает ее, то сверху деталь прижимают упором. Перемещая линзу в пределах соприкосновения с шариками кольца, берут каждый раз отсчет по измерительной шкале и микрометру. Повторяют несколько раз как для линзы, так и для плоского стекла. Разность отсчетов при наложении линзы и плоского стекла образует стрелу прогиба h , подставляя которую в приведенные выше формулы для R , вычисляют радиус кривизны R .

При измерении радиуса кривизны пары пробных стекол применение плоского стекла не требуется. Разность из двух отсчетов при наложении выпуклой, а затем вогнутой поверхностей даст удвоенную величину стрелки прогиба $2h$.

Радиус кривизны пары пробных стекол определяется формулой:

$$R = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) + \frac{h_1 + h_2}{4},$$

где h_1 и h_2 – стрелки прогиба выпуклой и вогнутой сферических поверхностей [2].

Метод автоколлимации из центра кривизны

Применяется для контроля пробных стекол с радиусом более 750 мм с точностью - $\pm /0,025-0,05/$ (%).

Измерения могут осуществляться с помощью автоколлимационного микроскопа и теневым методом ножа Фуко.

Автоколлимационный метод основан на принципе зеркального отражения нормально падающих лучей из центра кривизны полированных поверхностей. Направление падающих и отраженных лучей от сферических поверхностей совпадает с направлением радиусов кривизны.

По методу автоколлимации можно измерять радиусы кривизны сферических поверхностей различных размеров – от 0,5 мм до нескольких километров.

Для измерения малых радиусов кривизны – от 0,5 до 100 мм – вогнутых и выпуклых сферических поверхностей служат автоколлимационные микроскопы. Для вогнутых сферических поверхностей могут быть измерены радиусы до 5000 мм и более. В случае больших радиусов можно вместо микроскопов применить автоколлимационные окуляры. Для вогнутых поверхностей с радиусами кривизны от 500 до 5000 мм более удобно использовать длинномерные измерительные машины. Для выпуклых сферических поверхностей с радиусами от 50 до 500 мм требуется иметь длиннофокусные микроскопы или зрительные трубы с насадочными линзами. При измерении больших радиусов кривизны сферических поверхностей, мало отличающихся от плоских поверхностей, требуются сравнительно небольшие смещения окулярной подвижки, порядка нескольких сантиметров или миллиметров, поэтому применяют автоколлимационные зрительные трубы с длиннофокусными объективами порядка 1500 – 2000 мм.

Автоколлимационный метод измерения больших радиусов кривизны состоит в определении разности Δf между двумя фокусировками зрительной трубы на бесконечно удаленный предмет и на отраженное изображение креста нитей окуляра от поверхности контролируемой детали, помещенной перед объективом трубы.

В лабораторных условиях фокусировка на бесконечность производится методом автоколлимации при помощи образцового плоского зеркала, установленного также перед объективом трубы вместо контролируемой детали. Величина Δf находится из разности отсчетов для двух фокусировок по шкале окулярной подвижки трубы. Фокусное расстояние объектива зрительной трубы f' должно быть известно. Зная, что $R = x + f' - d$ и применяя формулу Ньютона $xx' = f'^2$, находим выражение, определяющее искомый радиус:

$$R = \frac{f'^2}{\Delta f} + f' - d,$$

где $\Delta f = x$ и d – расстояние между передней главной точкой объектива и поверхностью контролируемой детали.

При определении очень больших радиусов кривизны – до нескольких километров – значения d и f' можно не учитывать и вычисления выполнять по формуле:

$$R = \frac{f'^2}{\Delta f}.$$

Точность определения R зависит от ошибки фокусировки на автоколлимационные изображения и погрешности отсчетов по шкале окулярной подвижки. Например, если при работе применялась труба с фокусным расстоянием объектива $f' = 2000$ мм и величина $\Delta f = 2$ мм определена с ошибкой $d\Delta f = 0.01$ мм, то точность определения $R = 2000$ м определяется из выражения:

$$dR = \pm \frac{f'^2}{\Delta f^2} d\Delta f,$$

$$dR = \pm 10 \text{ м},$$

и относительная ошибка $\pm 0.5\%$.

Малые радиусы кривизны сферических поверхностей, начиная от 0 до 100 мм, а практически от 1 мм и более, удобно измерять при помощи автоколлимационного микроскопа, снабженного объективом с числовой апертурой не более 0,2 и с рабочим (свободным) расстоянием, которое должно быть больше измеряемого радиуса кривизны. Микроскоп должен иметь отсчетные устройства для фиксации фокусировок тубуса или стержня, на котором укрепляется контролируемая линза. С помощью автоколлимационного микроскопа измерение осуществляют на измерительной машине или специальной скамье. Максимальный радиус кривизны, который можно измерить, определяется длиной направляющих. Измеряемая линза помещается в патрон и центрируется относительно визирной оси автоколлимационного микроскопа (рис.22), который фокусируют последовательно в центр кривизны поверхности, а затем на саму поверхность, и берут отсчеты по шкале перемещения. Разность отсчетов дает радиус кривизны. Точность метода определяется чувствительностью продольных наводок и зависит от апертуры U_3 т.к. как апертура микроскопа должна быть несколько больше. В среднем $\frac{\Delta R}{R} = 0.02\%$.

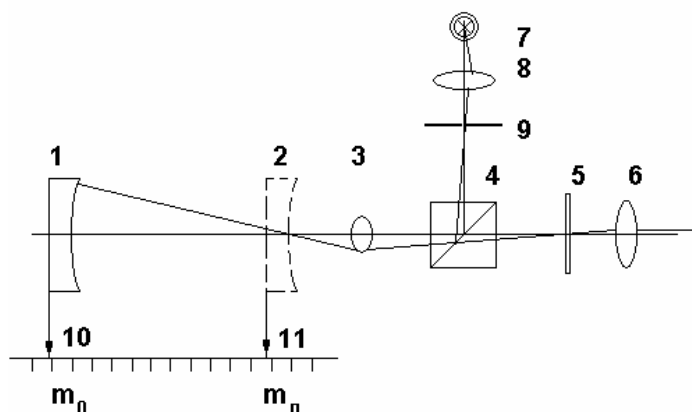


Рис. 22. Измерение радиуса кривизны с помощью автоколлимационного микроскопа
 1- измеряемая поверхность при определении положения центра кривизны,
 2 – то же при наводке на поверхность, 3 – микрообъектив, 4 – светоделитель, 5 –
 сетка, 6 – окуляр, 7 – лампа, 8 – конденсор, 9 – тест-объект

Чаще таким способом контролируют вогнутые полированные поверхности. Выпуклые поверхности можно контролировать только при небольшом радиусе кривизны, который меньше свободного расстояния микро-объектива, при этом приходится использовать объектив небольшой апертуры, что приводит к снижению точности измерения.

Измерение небольших радиусов кривизны в лабораторных условиях можно производить на автоколлимационном микроскопе, поместив деталь на его столик.

Метод измерения состоит из двух наводок (фокусировок): одна наводка на вогнутую или выпуклую сферическую поверхность линзы и другая – на ее центр, т. е. на отраженное изображение креста нитей окуляра от сферической поверхности. Разность отсчетов от двух фокусировок составит радиус кривизны R .

Точность измерения R зависит от отсчетных устройств и может быть в пределах 0,1 – 0,01% для радиусов от 1 до 50 мм и 0,01 – 0,001% для радиусов от 30 до 5000 мм.

Теневой метод Фуко

Теневой метод (см. часть 2) используется для контроля деталей больших габаритов. Он позволяет чувствительно определить положение центра кривизны сходящейся сферической волны. Измеряются вогнутые полированные поверхности. Светящаяся точка находится перед поверхностью вблизи её центра кривизны. Находят положение S' автоколлимационного изображения точки. Глаз располагают так, чтобы весь отраженный от поверхности пучок попадал в его зрачок, и поверхность была видна вся равномерно освещенной. В пучок лучей вводят нож и наблюдают соответствующие теневые картины на поверхности. Когда нож перекрывает изображение точки, вся поверхность (чувствительное положение ножа) будет темнеть равномерно. Измерение состоит в том, что устанавливают нож в чувствительное положение и измеряют расстояние между плоскостью ножа и поверхностью детали L , принимая его за R . Чувствительность установки ножа $1/60 \lambda$. При этом возникает систематическая ошибка от того, что центр кривизны поверхности O лежит не в плоскости ножа, а на окружности радиуса R , проходящей через S и S' .

Ошибка равна h . Можно внести поправку $h = \frac{a^2}{8L}$, приняв:

$$R = L + h,$$

где a – расстояние между S и S' .

Кроме того, возникают погрешности от перекосов прямой SS' относительно оси поверхности. Ошибки уменьшаются с уменьшением расстояния a . Конструктивно установку оформляют так, чтобы роль S играло освещенное отверстие в непрозрачном экране, а его край являлся

одновременно ножом. Расстояние L измеряется нутромером, а при очень больших значениях L – точной рулеткой. Погрешность - $(0,02 \div 0,05)\%$.

Метод колец Ньютона

Интерференционный метод позволяет определить стрелку прогиба поверхности с повышенной точностью ($\Delta h = 0.03$ мкм при двухлучевой интерференции и 0.003 при многолучевой интерференции). Метод выгодно использовать для измерения больших R , где ошибка измерения в основном определяется именно погрешностью Δh . ГОСТ рекомендует этим способом контролировать радиусы кривизны выпуклых пробных стекол с $R = 1000 \div 40000$ мм с применением многолучевой интерференции (поверхности покрывают высокоотражающим светоделительным покрытием). Для измерения стрелки прогиба поверхности плоское стекло накладывают на испытываемую поверхность и наблюдают интерференционные кольца, возникающие вокруг точки контакта. Считают число колец и определяют их диаметры $2r$.

$$h = N \frac{\lambda}{2}.$$

Измерение может производиться на инструментальном универсальном микроскопе или компараторе с точным перемещением столика для измерения $2r$. Кольца обычно считают не от центрального минимума, так как там поверхность может быть деформирована.

$$\Delta h = \frac{(N_2 - N_1)\lambda}{2},$$

где $N_2 - N_1$ – разность номеров последнего и первого колец.

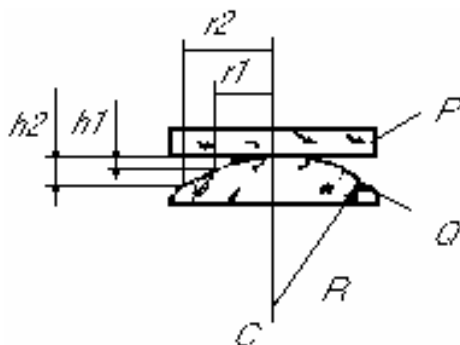


Рис. 23

В соответствии с формулой для Δh получим:

$$R = \frac{r_2^2 - r_1^2}{(N_2 - N_1)\lambda}.$$

Точность метода определяется точностью совмещения кольца с перекрестием при определении N и R . Поэтому имеем:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0.2}{N_2 - N_1}$$

при двухлучевой интерференции и:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0.02}{N_2 - N_1}$$

при многолучевой.

Из формулы видно, что точность тем выше, чем больше $N_2 - N_1$. На практике берут $N_2 - N_1 = (100 - 200)$.

Погрешность при двухлучевой интерференции – до 0.1%, а при многолучевой – 0.02%. В последнем случае точность измерения перемещения столика должна быть не менее 0,02 мм [2].

Методы контроля точности формы плоских поверхностей

а) С помощью трех плоскостей (абсолютный метод см. часть 1).

При его использовании для контроля N и ΔN пробных стекол для освещения применяется монохроматический источник и специальное устройство для оценки искривления интерференционных полос, например, окулярный микрометр.

б) С помощью плоского пробного стекла. Осуществляется так же, как и в случае сферических поверхностей.

в) С помощью интерферометра с плоской образцовой поверхностью.

г) С помощью автоколлиматора (для контроля радиусов кривизны поверхностей, близких к плоским).

д) С помощью наклонных труб Максудова для тех же целей.

е) Растровый метод для контроля N и ΔN .

Метод наклонных труб Максудова

Способ применяется для поверхностей большого размера (рис.18).

Измерение включает две операции.

1. Труба устанавливается встречно к коллиматору и фокусируется по нему на бесконечность (на резкое изображение сетки коллиматора, отсчет m_∞).

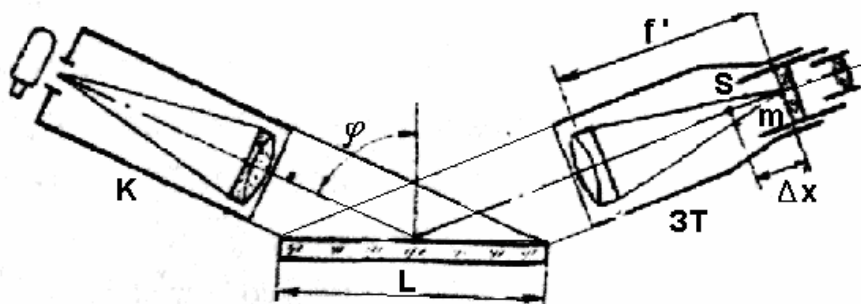


Рис. 24

Трубы устанавливают перед испытуемой системой под углом так, чтобы пучок, выходящий из коллиматора, освещал всю испытуемую поверхность, а отраженный - полностью попадал в объектив трубы. Трубу снова фокусируют на резкое изображение сетки коллиматора и берут отсчет m . Разность отсчетов, как и в предыдущем случае, дает отрезок x , по которому рассчитывается R . Точность метода определяется чувствительностью продольных наводок и вдвое ниже чем для автоколлимационного метода, так как здесь автоколлимации нет.

Растровый метод применяется, в основном, для контроля шлифованных поверхностей. Растр - стеклянная пластина с прозрачными и непрозрачными штрихами с постоянной решетки "С" - помещается вблизи контролируемой поверхности под небольшим углом α (рис.19).

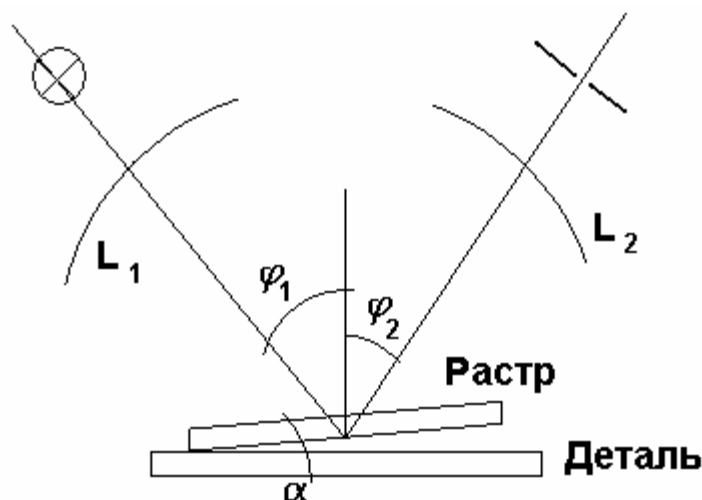


Рис. 25

При освещении белым светом со стороны угла клина и наблюдении через растр мы видим муаровые полосы, образованные при наложении растра и его изображения при отражении от поверхности. Плоскость визирования

должна быть перпендикулярна ребру клина. Оценка ошибок поверхности производится аналогично методу пробных стекол в числе колец с точностью до 0,1 полосы. Цена муаровой полосы K находится по формуле:

$$K = C \frac{1 \pm \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Формула справедлива при равных расстояниях L_1 и L_2 (от раstra до источника и глаза). Знак "+" берется при бугре, когда муаровые полосы повернуты вогнутой стороной к ребру клина (к источнику света). Чтобы блик зеркального отражения от поверхности детали не попадал в глаз, необходимо неравенство углов $\varphi_1 \neq \varphi_2$. Счет полос производится для сечения детали, лежащего в плоскости визирования (чертежа). Ширина полос зависит от угла α . Точность и чувствительность метода обусловлены выбором величин L, C, φ . При $1/C = 10-15$ штр/мм и рациональном выборе других параметров, погрешность и чувствительность равны $1 \div 3$ мкм. Прибор имеет отсчетные устройства для измерения углов $\varphi_1, \varphi_2, \alpha$ и расстояний L_1 и L_2 . Плоскость раstra, являющаяся плоскостью сравнения, изготавливается с погрешностью $N = 1$ интерференционной полосы.

Методы контроля асферических поверхностей

В последнее время в приборах все чаще используется оптика с асферическими поверхностями, так как их введение сильно упрощает оптическую систему прибора при тех же её характеристиках. При обработке асферических поверхностей требуется точность от 50 до 1 мкм в зависимости от назначения деталей. Для ответственных деталей требуются даже доли микрометра, но так точно еще не все поверхности умеют изготавливать и контролировать.

Асферические поверхности можно разделить на две группы:

- 1) поверхности, мало отличающиеся от сферы, которые получают в основном путем ретуши сферических;
- 2) поверхности вращения кривых второго и более высоких порядков, а также цилиндрические и торические.

Контроль асферических поверхностей первой группы

Контролируются обычными методами, т.е. с помощью сферических шаблонов, сферических пробных стекол ближайшего радиуса кривизны, или на интерферометрах со сферическим эталоном. Контроль пробными стеклами при отступлениях от сферы в несколько длин волн осуществляется в монохроматическом свете на установке метода колец Ньютона. Требуется специальное осветительное устройство, обеспечивающее освещение параллельным пучком лучей строго перпендикулярно к поверхностям, и

измерение расстояния от центра картины до исследуемых зон, в которых сравниваются расчетные Δp и фактические Δ_{cp} величины воздушных зазоров между поверхностями.

Ошибка изготовления Δy находится по формуле

$$\Delta y = \Delta_{cp} - \Delta p,$$

$$\text{где } \Delta_{cp} = \frac{\lambda}{2} N_{cp},$$

N_{cp} - среднее число интерференционных полос от центра до зоны x .

Пробные асферические стекла

Они используются для контроля полированных поверхностей вращения с асферичностью, не превышающей 10 мкм на 1 мм сечения. Методика контроля аналогична описанной для сфер. Отличие только в том, что при наложении поверхностей друг на друга, их надо тщательно центрировать до совпадения осей симметрии, т.е. до получения строго центричных интерференционных колец, при ошибке в центрировке на 0,25 мкм погрешность контроля может достичь двух колец. Оценки зональных ошибок производятся путем определения угловой величины $\Delta\varphi$ отклонения нормали

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

где N - число полос между двумя зонами поверхности, Δy - расстояние между зонами.

Метод колец Ньютона при контроле асферических поверхностей

Выполняется аналогично методу контроля сфер. Разница в том, что плоское пробное стекло накладывается в разных зонах поверхности, заданных углом α . При этом микроскоп для наблюдения интерференционной картины также должен поворачиваться на углы α .

В вершине поверхности картина будет иметь кольца, а в других точках - эллипсы. Измеряя радиусы колец или полуоси эллипсов, определяют значения R для меридионального и сагиттального сечения в данной точке поверхности. Точность порядка 3 мкм, так как при контроле асферики сложен переход от интерференции к линейным характеристикам поверхности. Так можно контролировать только выпуклые поверхности.

Измерение фокусных отрезков и фокусных расстояний

К геометрическим характеристикам оптической системы относятся фокусное расстояние f' , определяющее масштаб изображения, фокальные

отрезки S_F и s'_F , рабочее расстояние s_r (для объективов); увеличение Γ , поле (угловое 2ω или линейное $2y$), диаметры входного D и выходного D' зрачков.

Фокусный отрезок - расстояние от вершины последней поверхности системы до её главного фокуса. Фокусное расстояние - расстояние от главной точки до соответствующего главного фокуса.

Из определения видно, что фокусный отрезок с одной стороны, а фокусное расстояние с обеих сторон ограничены невещественными точками. В этом сложность измерения их величин. Поэтому фокусное расстояние, чаще всего измеряется косвенными, методами, и точность измерения обычно невысока.

Передние f и задние f' фокусные расстояния являются основными характеристиками объективов и линз. Как правило, измеряют заднее фокусное расстояние f' , которое будем называть просто фокусным расстоянием.

Предельно достижимая точность измерения для многих систем 0,1%. Измерение осуществляется на оптической скамье. Положение главного фокуса находится как место, где располагается изображение бесконечно удаленного предмета (точечного). В качестве такового используется центр перекрестия сетки коллиматора точно установленного на бесконечность. Такой способ определения положения F' неточен, так как вследствие дифракции изображение вдоль оси имеет конечные размеры, иногда довольно большие. Аберрации могут привести к еще большему увеличению длины изображения. Наиболее простой способ измерения отрезка - испытываемая система устанавливается на оптической скамье между коллиматором и микроскопом (рис.26). Микроскоп фокусируется на резкое изображение сетки коллиматора, а затем на последнюю поверхность испытываемой системы. В обоих положениях берутся отсчеты по шкале скамьи, разность которых дает S'_F . Так как оптическая поверхность не видна, то вторую фокусировку производят на пылинки, предварительно запыляя поверхность.

Может использоваться автоколлимационный метод измерения, при котором поверхность может быть не видна. Испытуемая система помещается между автоколлимационным микроскопом и плоским эталонным зеркалом. Микроскоп фокусируется на резкое автоколлимационное изображение от поверхности испытываемой системы и от точки F''_H . В последнем случае лучи отражаются от плоского эталона. Точность метода во всех случаях определяется чувствительностью продольных наводок и. зависит от действующей

апертуры схемы (наименьшей из апертур u и испытываемой системы и объектива микроскопа).

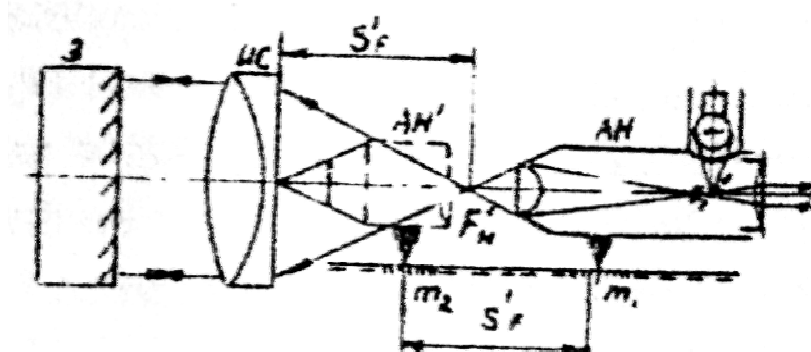


Рис. 26

Диаметр объектива коллиматора и его фокусное расстояние должны быть больше, чем у испытываемой системы. В этом случае уменьшается ошибка от неточности установки коллиматора на бесконечность. Апертура испытываемой системы используется полностью.

Методы измерения фокусного расстояния

В разных случаях требуется различная точность измерения. При контроле ответственных деталей, например, очковых линз, допустимая погрешность 1% достигается легко, без особых предосторожностей. При комплектовании оптики биноклярных приборов погрешность не должна превышать 0,1%. Она может быть получена только при измерении систем, у которых остаточные aberrации меньше 0,1% от фокусного расстояния, и при соблюдении других условий.

В особо ответственных случаях, например, при комплектовке объективов дальномеров и при измерении объективов коллиматоров измерительной машины, фотограмметрических камер и т.д. допускаемая погрешность - 0,05%. Такую точность можно получить у испытываемых систем с очень хорошей коррекцией, когда aberrации меньше 0,01% и при применении особой методики измерения. Испытываемая система при измерении обязательно должна находиться в положении наименьших aberrаций.

Прямой метод измерения фокусного расстояния

Основан на определении положения задней узловой точки системы и измерения расстояния между нею и задним главным фокусом. Испытываемую систему помещают на скамье перед коллиматором на поворотный столик. Через микроскоп наблюдают изображение сетки коллиматора C'_K (рис.27).

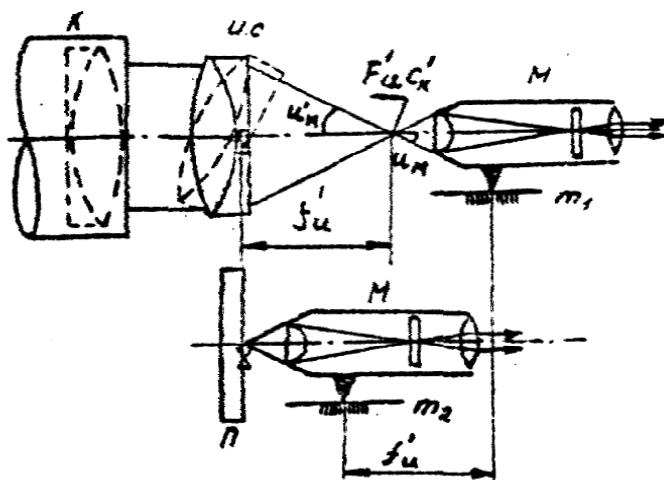


Рис.27

Устанавливают столик в такое положение, когда его поворот не будет смещать изображение сетки в поле зрения. В этом случае ось поворота столика проходит через заднюю узловую точку испытуемой системы. Микроскоп точно фокусируют на резкое изображение сетки, т.е. на F'_{II} , берут отсчет по шкале скамьи m_1 . Определяют положение оси поворота столика, поместив вместо испытуемой системы прозрачную пластину с перекрестьем так, чтобы её поверхность совпала с осью поворота столика. В этот момент поворот столика не будет вызывать смещения изображения перекрестья в поле зрения. Микроскоп точно фокусируют на резкое изображение сетки и берут второй отсчет по шкале m_2 .

$$F'_{II} = m_2 - m_1.$$

Точность метода определяется чувствительностью продольных наводок и зависит от u'_u и u_m . Вследствие этого его используют при измерении систем с большими апертурами, не имеющих дисторсии, например, короткофокусных фотообъективов с большим относительным отверстием. Метод пригоден для положительных систем в воздухе, так как только в этом случае узловые точки совпадают с главными. Диаметр объектива коллиматора и его фокусное расстояние должны быть больше, чем у испытуемой системы по указанным выше причинам. Недостатком метода является его сложность и невозможность получения большой точности при малых апертурах.

Метод фотоколлиматора. Это наиболее распространенный способ измерения фокусного расстояния в производственных условиях. Измеряется линейный размер изображения предмета, угловая величина которого должна быть известна.

Прибор состоит из неподвижного коллиматора с первоклассным объективом, диаметр которого больше диаметра испытуемой системы, окулярного микрометра, который может перемещаться вдоль оси прибора. В

фокальной плоскости объектива коллиматора помещена сетка, угловой размер которой β точно известен (рис.28).

Испытуемая система центрируется относительно оптической оси прибора. Окулярный микрометр фокусируется на резкое изображение сетки коллиматора, и с помощью микрометричного винта определяется размер изображения $2y'$. Система построена по принципу равных углов, т.е. $\beta = \beta'$, поэтому

$$F'_{II} = \frac{y'}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Для оценки точности метода получим формулу погрешности

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta y'}{y'} + \frac{\sec^2 \beta \cdot \Delta \beta}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Так как $\beta \leq (5 \div 6)^\circ$, то можно взять приближенно $\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta y'}{y'} + \frac{\Delta \beta}{\beta}$.

$\Delta y'$ будет определяться чувствительностью поперечных и продольных наводок, так как в системе не телецентрический ход лучей, и размер изображения зависит от точности фокусировки.

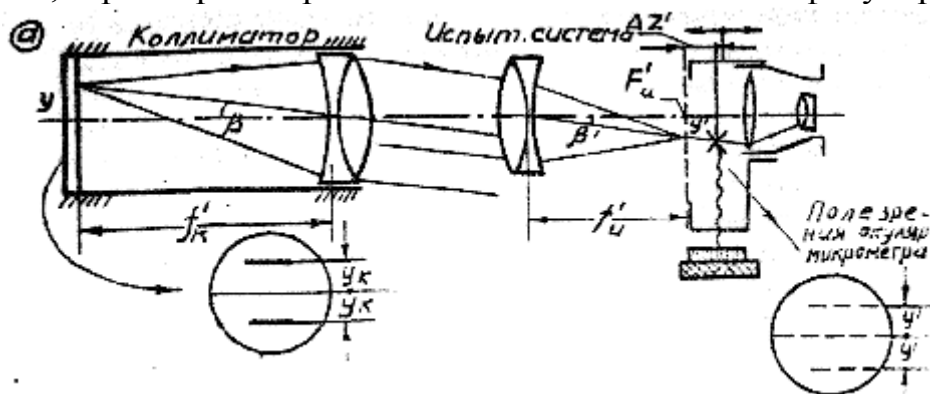


Рис.28

Предельная точность фокусировки скорректированной системы равна $\pm \Delta z'$, зависит от $u'_{у.с.}$. Это вызовет ошибку в измерении фокусного расстояния

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta z'}{u'_{у.с.}}.$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta y'_{non}}{y} + \frac{\Delta z'}{u'_{у.с.}} + \frac{\Delta \beta}{\beta}.$$

При определении точности прибора в Δy_{non} войдет еще погрешность окулярного микрометра.

Для получения точности 0,3% надо иметь окулярный микрометр с погрешностью отсчета 5 мкм, β должно быть известно с погрешностью до 10", а $\Delta z'$ не должно превышать 0,1 мм.

При погрешности $\frac{\Delta f'}{f'} = 0,1\%$ указанные величины ужесточаются соответственно до 2 мкм, 3", 0,01мм. Из этих цифр видно, насколько трудно получить такую точность. Измеряемые отрезки $2 y'$ должны быть симметричны относительно оси прибора.

В производственных условиях применяется несколько другая методика измерения. Окулярный микрометр содержит сетку шкалой, аналогичной шкале коллиматора. Столик с испытуемой системой перемещают до получения в плоскости сетки микрометра резкого изображения сетки коллиматора. Определяют сколько делений одной сетки m_1 укладывается в определенном числе делений m_2 изображения другой сетки, тогда

$$f'_{uc} = f'_k \frac{m_2}{m_1}.$$

Обычно f'_{uc} определяется по заранее рассчитанным таблицам прямо по отношению $\frac{m_2}{m_1}$.

При массовом контроле допуск задается на это отношение. При малых значениях f'_{uc} можно измерять отрицательные системы, заменив окулярный микрометр микроскопом с большим свободным расстоянием с окулярным микрометром. Точность таких измерений невысока.

Метод применяют также для контроля короткофокусных отрицательных систем. Для этого из контролируемой системы и положительного объектива (f'_o) составляют зрительную трубку Галилея. Измерение состоит в том, что, используя зрительную трубу с окулярным микрометром, измеряют размер изображения сетки коллиматора в ее поле зрения без испытуемой трубки (y') и после её введения между трубой и коллиматором (y''). Искусное расстояние - f'_{uc} линзы находят по формуле

$$f'_{uc} = \frac{f'_o y'}{y''}.$$

Фокометр Фабри - Юдина

Очень простой компактный прибор, но обладает меньшей точностью. Метод основан на внефокальных наблюдениях при использовании очень узких пучков лучей, которые имитируют отдельные геометрические лучи.

Если на расстоянии δ от фокуса испытуемой системы поставить матовый экран, то на нем будут видны следы двух лучей, прошедших через отверстия диафрагмы (рис.29), в виде светлых кружков, расстояние между которыми a_2 можно измерить. Тогда $f'_{uc} = \frac{a_1 \delta}{a_2}$. Однако измерение δ сложно, поэтому используют схему, приведенную на рис.29.

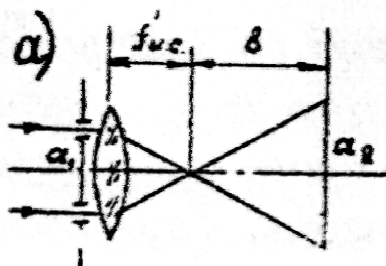


Рис.29

В фокальной плоскости объектива коллиматора помещена освещенная щель $ш_1$, а перед коллиматором находятся две симметричные оси щели $ш_2$, параллельные щели $ш_1$. Соосно с коллиматором расположена зрительная труба с окулярным микрометром, точно установленная, на бесконечность. Испытуемая система располагается между двумя трубами и центрируется относительно их оси. Вследствие дифракции от двух щелей, в плоскости сетки микрометра будут видны две системы полос расстояние, между которыми a_2 и измеряется. Для вывода расчетной формулы используем обозначения рис.30.

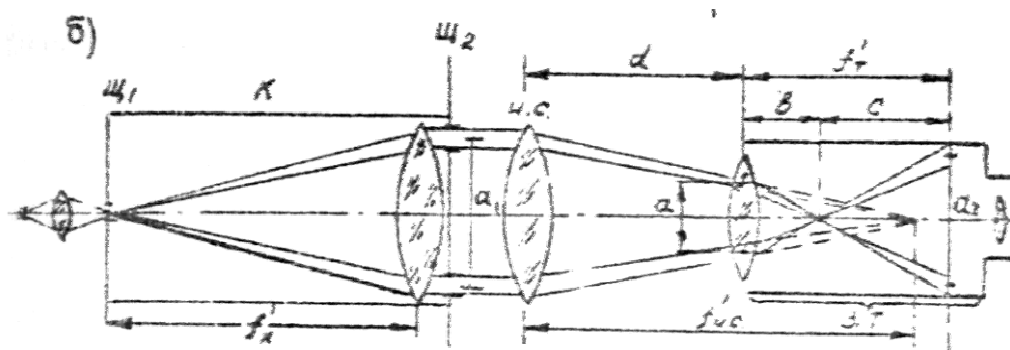


Рис.30

Из подобия треугольников:

$$\frac{a_1}{f'_{uc}} = \frac{a}{f'_{uc} - d}$$

$$\text{и} \quad \frac{a}{\vartheta} = \frac{a_2}{c},$$

откуда

$$a = \frac{\vartheta a_2}{c}.$$

По формуле отрезков

$$\frac{1}{f'_T} = \frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{f'_{uc} - d},$$

отсюда

$$\frac{1}{f'_{uc} - d} = \frac{f'_T - \vartheta}{f'_T \cdot \vartheta},$$

но $f'_T - \vartheta = c$.

Значения $\frac{1}{f'_{uc} - d} = \frac{c}{f'_{uc} - \vartheta}$ подставляют в первую формулу, заменив также a

$$\frac{a_1}{f'_{uc}} = \frac{\vartheta a_2 c}{c f'_T \vartheta}.$$

Отсюда, $f'_{uc} = \frac{a_1 f'_T}{a_2}$,

где $a_1 f'_T$ - постоянная прибора.

Точность метода определяется чувствительностью поперечных наводок и зависит от резкости и ширины нулевой центральной светлой полосы

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta a_2}{a_2}.$$

Метод пригоден для контроля отрицательных и положительных систем в большом диапазоне фокусных расстояний (от 70 до 5000 мм). Длина установки не зависит от измеряемого фокусного расстояния. Погрешность измерения 0,3-1%. Для получения максимальной точности надо брать a как можно больше и подбирать оптимальную ширину деталей.

Метод коллиматора и трубы с фокусировкой.

Применяется для определения очень больших фокусных расстояний, в частности, при обнаружении фокусирующего действия деталей с плоскими поверхностями, вызванного погрешностями изготовления. Для измерения используются установленный на бесконечность коллиматор и труба с

выдвижным окулярным тубусом со шкалой (точность отсчета 0,1 мм). Сначала трубу устанавливают по коллиматору на бесконечность и берут отсчет по шкале трубы m_∞ . Затем между трубами помещают испытуемую систему и снова фокусируют трубу на резкое изображение сетки коллиматора, беря отсчет m . Разность отсчетов дает величину x'_T . Формулы для расчета f'_{uc} [2]:

$$f'_{uc} = -\frac{f_T'^2}{x'_T} - f'_T + d.$$

Когда f'_{uc} - сотни метров, то можно считать приближенно, что

$$f'_{uc} \cong -\frac{f_T'^2}{x'_T} = -\frac{f_T'^2}{m - m_\infty},$$

(x'_T подставляется с различным знаком).

Если перед вторым отсчетом тубус выдвигается, то x'_T - отрицательно.

Точность метода определяется чувствительностью продольных наводок. Самое большое фокусное расстояние, которое еще можно обнаружить этим методом, не может превышать практической бесконечности трубы, которая будет определяться действующим диаметром испытуемой системы, так как диаметры объективов труб берутся большими. Минимальное фокусное расстояние, которое можно измерить, зависит от пределов фокусировки окулярного тубуса трубы. Точность установки коллиматора на бесконечность не имеет существенного значения, так как x'_T находится как разность отсчетов. Метод может осуществляться и в автоколлимационной схеме, когда вместо коллиматора используется плоское зеркало, а труба снабжается автоколлимационным окуляром. Фокусировка на резкое автоколлимационное изображение в плоскости сетки производится без измеряемой системы, и после её введения. Точность и чувствительность автоколлимационного метода в два раза выше. Еще большая чувствительность и точность достигается, когда измерение производится без плоского эталона. Автоколлимационную зрительную трубу фокусируют последовательно на два автоколлимационных изображения в лучах, отраженных от наружной и внутренней поверхностей детали, беря отсчеты по шкале окулярного тубуса $m_2 - m_1 = \Delta x'_T$, где $\Delta x'_T$ - разность задних отрезков при двух фокусировках.

Фокусное расстояние детали f'_{uc} находится по формуле

$$f'_{uc} = \frac{2n}{n-1} \cdot \frac{f_T'^2}{\Delta x'_T},$$

Точность и чувствительность этого метода примерно в пять раз выше коллимационного, так как сама измеряемая величина здесь гораздо больше.

Метод позволяет при достаточно больших f'_{uc} и действующем диаметре обнаружить фокусирующее действие детали, имеющей ошибки поверхности в сотые доли полосы.

Недостатки метода:

- необходимо знать показатель преломления материала до $\Delta n = 0.01 \div 0.001$;
- на точность измерения оказывает влияние неоднородность показателя преломления материала.

Заключение

Методы оптических измерений геометрических параметров оптических систем и элементов чрезвычайно многообразны, и ограниченный объем данного пособия не позволяет охватить все методы и схемы. Необходимая информация содержится в литературе из приведенного списка.

В наши дни оплотехника и область оптических измерений переживают интереснейший период, связанный с бурным развитием информационных технологий, методы которых все глубже проникают в практику оптического приборостроения и исследований.

Может быть предложена классификация известных и развивающихся методов и аппаратуры оптических измерений, опирающаяся на положение о том, что на текущий момент можно указать три поколения приборов и методов оптических измерений.

Средства оптических измерений **первого поколения** включают приборы и методы классических оптических измерений. Эти средства основаны на использовании глаза (зрительного аппарата человека) в качестве приемника и анализатора информации. Глаз воспринимает оптическое измерительное изображение, опознает его детали (основные, рабочие) и извлекает информацию, передаваемую оптическим сигналом, то есть оптико-измерительным изображением, методами оптико-измерительных наводок и интуитивных оценок.

Средства оптических измерений **второго поколения** составляют приборы и методы, где глаз наблюдателя заменяют приборным (обычно - электронным) приемником изображения. Такой приемник, вместе с электронными и компьютерными системами обработки информации, моделирует функции глаза при использовании того же исходного оптико-измерительного изображения, как и в случае средств первого поколения.

Механизм извлечения моделирует операции наводок и оценок, выполняемые глазом.

Средства оптических измерений **третьего поколения** не направлены на моделирование операций классических визуальных измерений. Здесь используются новые методы извлечения оптико - измерительной информации, дающие принципиально улучшенные результаты. Исходное оптико-измерительное изображение подвергается структурной трансформации, что позволяет повысить точность оптических измерительных наводок в десятки раз, а количество извлекаемой информации на 2 - 3 порядка при радикальном расширении диапазона измерений и резком улучшении отношения сигнала к шуму [10]. Эти достижения сопровождают следующие преимущества методов: наглядность, оперативность, надежность и достоверность, простота и экономичность конструктивных решений.

Начало целенаправленному развитию направления средств оптических исследований и измерений 3-го поколения было положено комплексом работ, проводившихся (под руководством профессора В.А.Зверева) при выполнении программы создания ряда гигантских астрономических телескопов, включая крупнейший в мире телескоп БТА с диаметром главного зеркала 6 метров.

Анализ совокупности оптических методов и схем измерений и исследований и их систематизация выполнены на основе вновь созданного и описанного в учебном пособии [14] аппарата многомерных функций преобразования. Вводится понятие развитой функции преобразования (ФП), свойственной методу и средству оптических измерений, исследований и контроля. Здесь ФП - функция одной или нескольких переменных, заданным образом связывающая параметры объекта исследования, отображенные в структуре волнового фронта, со структурой формируемого в схеме контроля оптико-измерительного изображения (например, интерферограммы, теневой картины, пятна рассеяния и т.д.). В современной практике общая ФП метода оптического измерения и исследования складывается, по крайней мере, из двух составляющих: 1) ФП оптической установки контроля (ФП первого порядка, которая описывает работу модуля-анализатора 1-го порядка); 2) ФП приемника-анализатора оптико-измерительного изображения (ФП второго порядка, которая описывает работу модуля-анализатора 2-го порядка).

Большинство традиционных методов характеризуется плавной функцией преобразования. Так, при экспериментальной оценке качества изображения путем фотографической фотометрии, характеристическая кривая фотоматериала на прямолинейном участке связывает оптическую плотность фотографического почернения D_n с логарифмом экспозиции $\lg H$ через коэффициент контрастности γ :

$$D_n = \gamma \lg H .$$

В теновом методе Фуко-Филбера действует линейная ФП как зависимость освещенности E_T в теневой картине от поперечной аберрации δl с коэффициентом пропорциональности k :

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

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

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

Недостатки плавных ФП [14]: ограниченный динамический диапазон, низкая чувствительность визуальных измерительных наводок, связанная с нечеткостью элементов оптико-измерительного изображения, и высокая избыточность информации при автоматизированной расшифровке и интерпретации таких оптико-измерительных изображений.

Для устранения выявленных недостатков и получения эффективных методов и средств, обладающих новыми свойствами и расширенными возможностями, дано развитие системы ФП [14]. Предложен ряд типовых ФП, которым присвоены условные названия 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 относительной интенсивности в оптико-измерительном изображении.

В частности, в принятый ряд базовых ФП внесены:

ФП типа "клин", соответствующая линейной функции преобразования	$I = W \operatorname{tg} \alpha$, где $\operatorname{tg} \alpha$ - градиент;
Периодическая ФП типа "синусоида"	$I = 1 + \cos (2\pi W / \lambda_w)$;
ФП типа "импульс"	$I(W) = I_{\max}$ при $W = 0$ 0 при $W \neq 0$
Периодическая ФП типа "гребенка"	$I(W) = I_{\max}$ при $W / \lambda_w = 0, 1, 2, 3, \dots$ 0 при $W / \lambda_w \neq 0, 1, 2, 3, \dots$

Разработанная система развитых функций преобразования 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, оперативности и производительности.

Упрощаются задачи автоматизации контроля и исследований, создаются расширенные предпосылки для компьютерного моделирования методов и систем оптических измерений и исследований. На этой базе разработаны новые методы и аппаратура исследования прецизионных поверхностей и оптических систем. В их числе – новые методы и аппаратура дифракционной интерферометрии, а также методы изофотометрии функций рассеяния, имеющие непревзойденный динамический диапазон, на уровне 5 порядков перепада анализируемых интенсивностей оптического изображения, при одновременной возможности работы в режиме реального времени.

Обстоятельное рассмотрение новых методов и аппаратуры будет дано в последующих частях данного пособия.

Литература

1. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М. Машиностроение, 1987.
2. Порохова Т. Г. Оптические измерения, ч.1. Л.ЛИТМО. 1976 г.
3. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Высшая школа, 1981.
4. Афанасьев В.А. и др. Автоколлимационные приборы. - М.: Недра, 1982.
5. Ключникова Л.В., Ключников В.В. Проектирование оптико-механических приборов. СПб. Политехника, 1995.
6. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М. Машиностроение. 1974.
7. Кулагин С.В. и др. Оптико-механические приборы. М. Машиностроение, 1984.
8. Еськова Л.М. Оптические измерения. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1984 .
9. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.-Л. Машиностроение. 1966.
10. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение. 1984.
11. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 2. Учебное пособие. СПб. ГИТМО (ТУ) . 2003.
12. Порохова Т.Г. Оптические измерения. Часть 2. Л. ЛИТМО. 1977 г.
13. Лившиц Э.М. Оптические измерения. Учебное пособие по лабораторному практикуму. Л.ЛИТМО. 1984.
14. Кирилловский В.К., Анитропова И.Л., Иванова Т.А. Синтез комплекса методов и унифицированных приборов оптического контроля. Учебное пособие. Л. ЛИТМО 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА	5
<i>Работа измерительного оптического прибора</i>	7
<i>Характеристики изображающих оптических систем</i>	8
ФУНКЦИОНАЛЬНО-МОДУЛЬНАЯ ИДЕОЛОГИЯ СИНТЕЗА И УНИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ	8
<i>Исследование обобщенной функциональной структуры прибора оптического контроля; блоки - модули</i>	8
ТИПОВЫЕ УЗЛЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	13
<i>Коллиматор</i>	13
<i>Измерительный микроскоп</i>	16
<i>Зрительная труба</i>	19
<i>Автоколлимационная зрительная труба</i>	22
АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП	24
<i>Пути применения вычислительной техники в оптическом приборостроении и контроле</i>	26
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ВЕЛИЧИН	29
<i>Общие сведения</i>	29
<i>Измерение толщин линз, воздушных промежутков и линейных размеров деталей</i>	30
<i>Методы измерения малых линейных размеров - измерение поперечных размеров в поле зрения микроскопа</i>	32
<i>Методы измерения толщины тонких пленок</i>	33
<i>Определение толщины пленки по спектральным кривым отражения или пропускания</i>	34
<i>Измерение толщин пленок с помощью двойного микроскопа</i>	35
<i>Измерение толщины пленки на интерферометре</i>	35
<i>Измерение шероховатости поверхностей</i>	36
<i>Аттестация линейных шкал и сеток оптических приборов</i>	37
<i>Методы измерения радиусов кривизны и контроль формы сферических поверхностей</i>	37
<i>Кольцевой сферометр</i>	39
<i>Метод автоколлимации из центра кривизны</i>	41
<i>Теневой метод Фуко</i>	44
<i>Метод колец Ньютона</i>	45
<i>Методы контроля точности формы плоских поверхностей</i>	46
<i>Метод наклонных труб Максудова</i>	46
<i>Методы контроля асферических поверхностей</i>	48
<i>Контроль асферических поверхностей первой группы</i>	48

<i>Пробные асферические стекла</i>	<i>49</i>
<i>где N - число полос между двумя зонами поверхности, Δy - расстояние</i>	
<i>между зонами.....</i>	<i>49</i>
<i>Метод колец Ньютона при контроле асферических поверхностей</i>	<i>49</i>
<i>Измерение фокусных отрезков и фокусных расстояний.....</i>	<i>49</i>
<i>Методы измерения фокусного расстояния</i>	<i>51</i>
<i>Прямой метод измерения фокусного расстояния.....</i>	<i>51</i>
<i>Фокометр Фабри - Юдина.....</i>	<i>55</i>
<i>Метод коллиматора и трубы с фокусировкой.....</i>	<i>56</i>
<i>Заключение</i>	<i>58</i>
ЛИТЕРАТУРА	61

Название кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета) отражает новейшую тенденцию проникновения компьютерных технологий во все сферы науки и техники. В то же время эта кафедра является прямой наследницей старейших оптических кафедр России – кафедры теории оптических приборов, физиологической оптики, оптических приборов, лабораторных, а затем оптико-механических приборов. В разное время этими кафедрами заведовали и работали на них такие выдающиеся ученые как академик В.П. Линник, член-корреспондент Академии наук СССР профессор В.С. Игнатовский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук В.Н. Чуриловский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Ленинской и четырех Государственных премий, премии Французской Академии наук, профессор, доктор технических наук М.М. Русинов, заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор, доктор технических наук И.И. Крыжановский, член-корреспондент Академии артиллерийских наук, профессор, доктор технических наук А.Н. Захарьевский, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Ленинской премии и премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук В.А. Зверев, лауреат Государственной премии и премии Совета Министров СССР профессор, доктор технических наук А.П. Грамматин, лауреат Государственной премии профессор, доктор технических наук П.Д. Иванов, лауреат премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук С.А. Родионов.

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

В списке достижений кафедры: создание непревзойденных широкоугольных аэрофотосъемочных объективов с улучшенным светораспределением по полю и приборов обработки аэрофотоснимков (М.М. Русинов, Н.А. Агальцова), превосходящие зарубежные аналоги гидросъемочные объективы (М.М. Русинов, П.Д. Иванов, Л.Н. Курчинская),

методы и средства контроля главного зеркала телескопа БТА (В.А. Зверев, С.А. Родионов, В.В. Усоскин), металлостеклянная оптика (И.И. Крыжановский, С.М. Никитин), оптика для космического проекта “Вега” (Г.И. Цуканова), высокоскоростные кинокамеры для научных исследований (И.И. Крыжановский, В.И. Решеткин), компьютерные пакеты автоматизированного проектирования оптики (С.А. Родионов с сотрудниками). Эти достижения в свое время были отмечены двумя ленинскими премиями, пятью государственными премиями, премией Совета Министров СССР, премией французской академии наук. В настоящее время кафедра ведет подготовку специалистов и научную работу в следующих взаимосвязанных направлениях:

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

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

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

С 1965 г. на кафедре оптико-механических приборов благодаря новаторским идеям и методам С.А. Родионова получает развитие новое направление в прикладной оптике – разработка математических методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптических задач. Результаты фундаментальных исследований С.А. Родионова в области формирования изображения, теории дифракции и математического моделирования были положены в основу разработки пакета программ для автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ, широко известного в оптической промышленности.

В настоящее время объектами исследований в области компьютерной

оптики, проводимых на кафедре являются:

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

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

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

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

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

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

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

Владимир Константинович Кирилловский

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 3.

Функциональная схема прибора оптических измерений. Типовые узлы.
Оптические измерения геометрических параметров.

В авторской редакции

Компьютерная верстка

Т.В.Суровегина

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

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано к печати 15.01.05

Отпечатано на ризографе. Тираж 300 экз. Заказ №812.



Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета) 197101, Санкт-Петербург, ул. Саблинская, 14	
--	--