

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗУЮЩИХ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛЯРИМЕТРЕ – ПОЛАМАТ-А

Цель работы: изучение поляризационных свойств оптических материалов (кристаллический кварц различной ориентации) в видимой области спектра на фотоэлектрическом рутинном поляриметре - ПОЛАМАТ - А.

Теоретические сведения. Явление вращения плоскости поляризации открыл Араго в кварце в 1811г., а Био, обнаружив его и в некоторых жидкостях в 1815г., доказал, что поворот плоскости поляризации увеличивается пропорционально толщине активного слоя. [1]

Явление вращения плоскости поляризации имеет место в весьма разнообразных телах, получивших название естественно активных. Исследования показали, что объяснение этого явления можно получить, рассматривая общую задачу взаимодействия поля световой волны с молекулами или атомами вещества, если только принять во внимание конечные размеры молекул и их структуры.

Поляризованный луч, проходящий вдоль оси одноосного кристалла, не подвергается никакому изменению (1). Однако Араго заметил, что если в этом опыте воспользоваться кварцем, то плоскость поляризации поворачивается на угол, пропорциональный толщине кристалла, пройденной лучом. Это явление было далее изучено Био, который нашёл, что вращение, вызываемое данной толщиной, обратно пропорционально квадрату длины волны света, и, т. о., очень быстро изменяется с цветом. В одних образцах кварца вращение происходит вправо (вследствие чего они и были названы правовращающими), в других - влево. Поэтому равные толщины право - и левовращающего кварца могут компенсировать друг друга.

Френель показал, что вращение плоскости поляризации можно объяснять различной скоростью распространения двух поляризованных по кругу составляющих, на которые всегда можно разложить линейно поляризованный свет. В обыкновенных средах лучи, поляризованные по кругу вправо и влево, распространяющиеся с одной и той же скоростью и на любом участке своего пути при сложении дают снова луч, поляризованный линейно в определённом направлении. Но дело обстоит иначе, если скорости распространения поляризованных по кругу составляющих, хотя бы немного отличны друг от друга. Новая поляризованная по кругу волна может быть представлена так:

$$\xi_1 = r \cos(nt - k_1 z), \quad \eta_1 = r \sin(nt - k_1 z), \quad (1)$$

вторая (равной амплитуды):

$$\xi_2 = r \cos(nt - k_2 z), \quad \eta_2 = r \sin(nt - k_2 z), \quad (2)$$

Результирующая (1) и (2) есть:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2r \cos \frac{1}{2}(k_2 - k_1)z - \cos \left\{ nt - \frac{1}{2}(k_1 + k_2)z \right\},$$

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = 2r \sin \frac{1}{2}(k_2 - k_1)z - \cos \left\{ nt - \frac{1}{2}(k_1 + k_2)z \right\},$$

так, что

$$\frac{\eta}{\xi} = \operatorname{tg} \frac{1}{2}(k_2 - k_1)z, \quad (3)$$

где: ξ , η - две составляющие смещения.

Это равенство показывает, что при любом заданном значении z свет является линейно - поляризованным. Направление плоскости его поляризации, однако, меняется с z . Таким образом, если $\frac{\eta}{\xi} = \operatorname{tg} \theta$ так что θ

представляет угол между направлением колебания и осью ξ , то мы имеем соотношение:

$$\theta = \frac{1}{2}(k_2 - k_1)z, \quad (4)$$

указывающее на вращение, пропорциональное z . Величины k_1 и k_2 обратно пропорциональных длинам волн, поляризованных по кругу составляющих одного и того же периода.

Когда относительное запаздывание составляет целый период

$$(k_2 - k_1)z = 2\pi,$$

тогда по (4) $\theta = \pi$. Вращение плоскости поляризации на два прямых угла восстанавливает первоначальное состояние поляризации. В кварце вращение очень велико, и составляет в случае желтого света около 24° на каждый пройденный светом миллиметр пути. В кварце вращение плоскости поляризации обусловлено его кристаллической структурой, но имеется много жидкостей, например терпентинное масло, обыкновенный сахарный сироп, производящих такое же действие. В таких случаях вращение, конечно, не зависит от направления света, оно должно быть обусловлено некоторыми особенностями в строении молекул. Возможность сообщения вращательной способности телам, не обладающим ею, была одним из самых тонких открытий Фарадея. Он нашёл, что если тяжёлое стекло, сероуглерод и т.д. поместить в магнитное поле, то имеет место вращение плоскости поляризации луча, распространяющегося вдоль магнитных силовых линий. Законы этого явления были тщательно изучены Верде, выводы которого можно вкратце сформулировать как: в данной среде вращения плоскости поляризации луча, распространяющегося в любом направлении, пропорционально разности магнитных потенциалов в начальной и конечной точках. Следует отметить весьма важную разницу между магнитным и естественным вращениями кварца. В последнем случае вращения всегда происходит либо вправо, либо влево по отношению к направлению луча. Следовательно, при обращении луча обращается также и абсолютное

направление вращения. Луч, который проходит через пластинку кварца в одном направлении, а затем, после отражения проходит ту же толщину снова в противоположном направлении, возвращается к своей первоначальной плоскости поляризации. Совершенно иначе обстоит дело при магнитном вращении. В этом случае абсолютное направление вращения одно и то же даже при обращении луча. Поэтому, если луч отражается назад и вперёд любое число раз вдоль магнитной силовой линии, то вращение при всех последовательных прохождении накапливается.

Описание поляриметра ПОЛАМАТ-А

Для измерения угла вращения плоскости поляризации различными образами используется фотоэлектрический рутинный поляриметр - ПОЛАМАТ-А, позволяющий полностью и с высокой скоростью установить измеряемую величину, индикация которой проводится путём светосильной проекции участка делительного круга.

Фотоэлектрический поляриметр - ПОЛАМАТ-А представляет собой прибор, отличающийся современной и рациональной конструкцией, содержащей все элементы питания и усиления. На лицевой панели размещены органы управления, т. е. выключатель (30), (см. рис. 1) для установки усиления при смене длины волны измерения и кнопка (31) для юстировки нулевой точки.

Под отделением для проб, закрываемым крышкой (32), находится проекционное окошко (33), наклонное для более удобного снятия отсчёта измеряемой величины. На задней стенке (см. рис.2) существует переключатель шкал (39) для установки угловой шкалы (\angle) или междупородной сахарной (S) Из-за того, что в приборе ПОЛАМАТ-А интерференционные светофильтры для выбора длины волны размещены за измерительным участком, был предусмотрен заградительный светофильтр (10) с кантом полосы поглощения примерно на 520нм, включаемый в ход лучей с помощью рычага (36) и поглощающий при измерении с определённой длиной волны 546,1нм все коротковолновые линии испускаемой ртутной лампой энергии излучения, которые могли бы оказывать влияние на чувствительные пробы или вызывать флуоресценцию. Светофильтр находится в ходе лучей, когда рычаг (36) фиксируется в нижнем замаркированном символом (1), положении. Для кабеля, подключающего прибор к сети, предусмотрено гнездо (37).

Процесс измерения на приборе ПОЛАМАТ-А:

Процесс измерения на приборе ПОЛАМАТ-А происходит следующим образом: через соединительный провод подсоединить прибор к сети. Установить выключатель (34) в положение (I) и подождать около 5 минут до полной стабилизации режима горения лампы; установить длину волны тумблером (30), а тумблером (35) установить соответствующую степень

усиления (обозначается одинаковой длиной волны). В случае измерения на длинах волн 365нм, 405нм, 436нм необходимо рычагом (36) выключить отсекающий светофильтр (вывести его из хода лучей), т. е., установить рычаг в положение (0) . При включённом светофильтре замечают на листе бумаги, помещённом в ход лучей, зеленоватую окраску светового пятна; включение желаемой индикаторной шкалы производится с помощью рычага (39); нулевая точка устанавливается кнопкой (31). При смене длины волны возможно незначительное смещение нулевой точки, на которое нужно исправить значение измеряемой величины поворота для одного и того же образца на различных длинах воли. При работе с постоянной длиной волны исправление нулевой точки производится с помощью кнопки (31); Помещение исследуемого образца в отделение для проб, для чего следует откинуть крышку (32). Отделение для проб представляет собой желоб, трапецеидальный в разрезе, длиной 230мм, изготовленный из латуни с никелевым покрытием; образец необходимо установить таким образом, чтобы луч падал на него приблизительно по нормали к поверхности образца. Для проведения измерений на определённой длине волны в ход лучей необходимо поместить соответствующий светофильтр, так, чтобы луч падал на его поверхность приблизительно по нормали; снятие отсчёта измеряемой величины с проекционного окошка. Индикация измеряемой величины в приборе ПОЛАМАТ-А производится путём проекции шкалы делительного круга на проекционное окошко (33), находящееся под отделением для проб. Положение и наклонное расположение проекционного окошка обеспечивает удобный отсчёт измеряемой величины. Делительный круг прибора ПОЛАМАТ-А имеет две шкалы, одна из которых после фиксации рычага (39) в одном из положений видно на проекционном окошке. Деление угловой шкалы позволяет снять отсчёт величины угла поворота плоскости поляризации образца с точностью до $0,003^\circ$, погрешность измерения $\pm 0,01$ Отсчёт по нониусу существенно упрощается тем, что угловая шкала и нониус не соприкасаются и совмещение штриха шкалы со штрихом нониуса указывается загоранием соединительного штриха в промежутке. При отсчете направления вращения, угловые деления для лево - и правовращающих образцов находятся на разных делительных радиусах. Наряду с угловой шкалой прибор ПОЛАМАТ-А оснащен международной сахарной шкалой 5', которая непосредственно показывает процент сахара, имеющийся в исследуемом растворе.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить прибор тумблером «Сеть» и прогреть в течение 15 минут.
2. Установить нулевой отчёт.

3. Вставить контролируемый образец №1 в оправе в приспособление и затем поместить его в кюветное отделение прибора ПОЛАМАТ-А.

4. Снять показания с угловой шкалы.

5. Меняя угол падения α света при повороте образца через 10° от 0° до 40° включительно, снять показания с прибора. Измерения произвести 3-5 раз.

6. Повторить пункты 2, 3, 4, 5 для образца №2.

7. По средним значениям построить график зависимости угла поворота плоскости поляризации φ , от угла падения света.

8. Измерить зависимость φ от λ . Для этого из стандартного набора оптического цветного стекла взять для:

- $\lambda=365$ нм БС-7 и УФС-6,
- $\lambda=405$ нм ЖС-10 и ПС-13,
- $\lambda=436$ нм ЖС-12 и СС-15,
- $\lambda=578$ нм ОС-13 и ЗС-7.

Измерение проводить с образцом толщиной 1мм.

9. Построить график зависимости $\varphi=f(\lambda)$.

Оформление отчета

Отчёт должен содержать:

1. Цель работы и суть метода контроля.
2. Графики зависимости: $\varphi=f(\alpha)$, $\varphi=f(\lambda)$.
3. Выводы по данной работе.

Контрольные вопросы

1. Суть явления вращения плоскости поляризации в кристаллическом кварце.
2. Порядок проведения измерений на поляриметре ПОЛАМАТ-А.
3. Как оценивается погрешность результатов измерений.

Список литературы

1. Ландсберг Г. С. Оптика М. – Наука, 1976г.
2. Описание прибора «ПОЛАМАТ-А», Карл Цейсс, Йена 1985г.

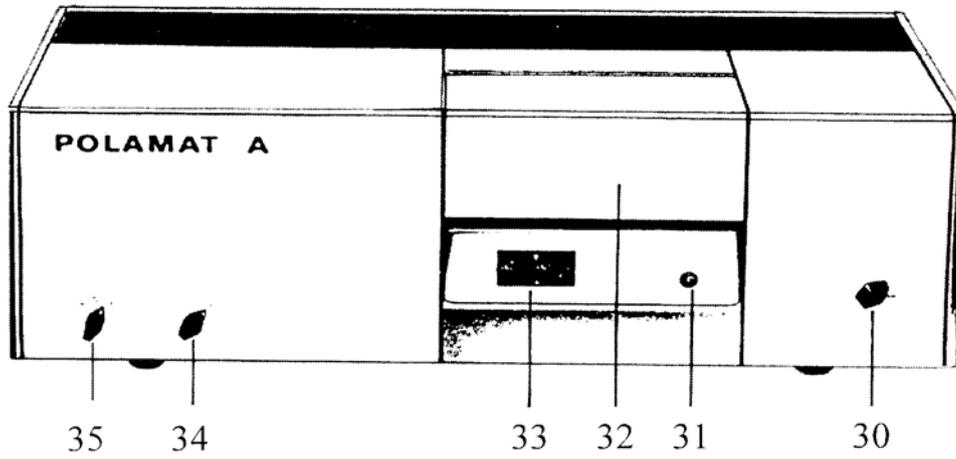


Рис. 1. Лицевая панель поляриметра «ПОЛАМАТ-А»

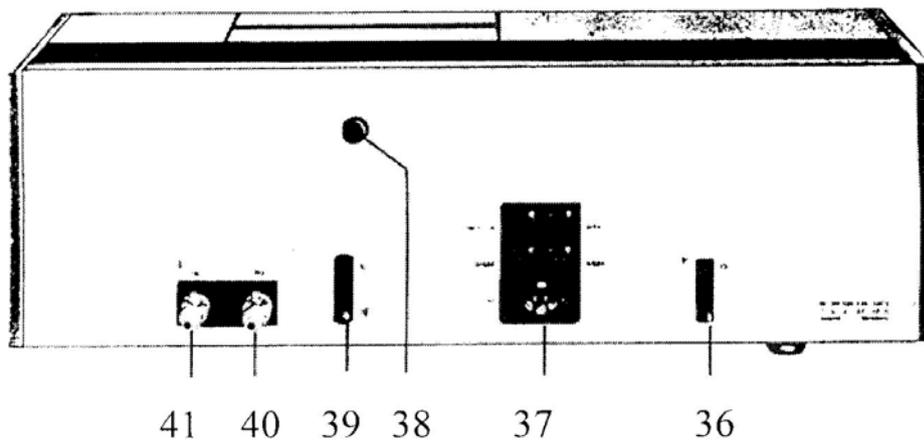


Рис. 2. Тыльная часть поляриметра «ПОЛАМАТ-А»

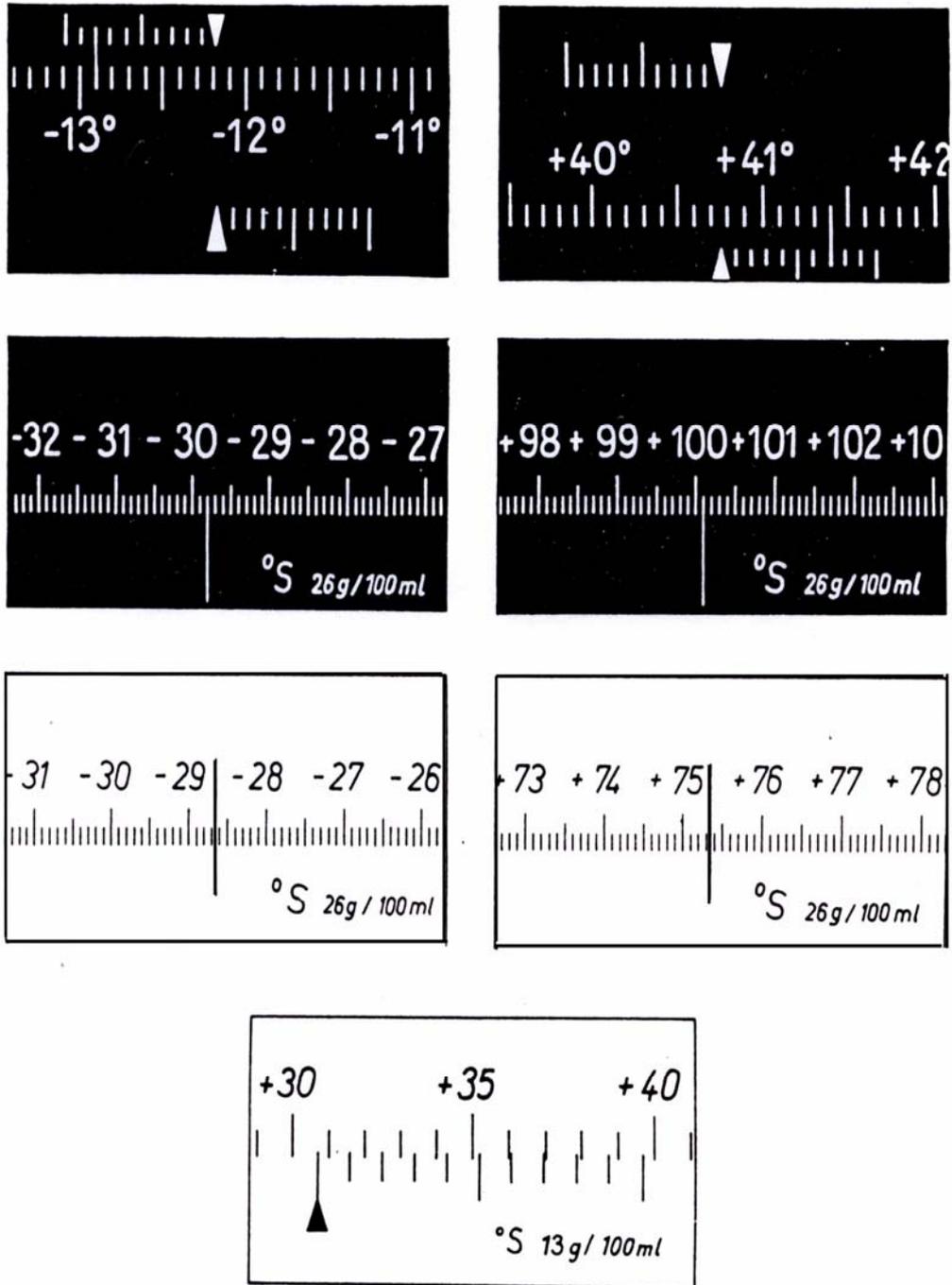


Рис. 3. Шкала устройства ПОЛАМАТ-А

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

КОНТРОЛЬ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы: изучение разрушающего метода контроля лучевой прочности оптических покрытий.

Развитие квантовой электроники (разработка и эксплуатация мощных импульсных лазеров) выдвинуло на передний план проблему лучевой прочности оптических элементов лазеров и, в первую очередь, диэлектрических зеркал резонаторов лазера. Именно разрушение этих элементов под действием собственного излучения лазера ограничивает их предельную мощность, стабильность, срок службы и является одной из основных причин, препятствующих созданию мощных и экономичных лазерных систем.

При сильном воздействии лазерного излучения на прозрачные диэлектрики происходят поглощение и аккумуляция энергии, преобразование ее в другие виды (тепловую, механическую и др.) и при превышении интенсивности излучения некоторой пороговой величины – динамическое развитие микро-, а затем и макроразрушений. Проявление этих разрушений в зависимости от свойств материала и параметров лазерного воздействия будет различным. Для объема оптических материалов характерны точечные повреждения, звездообразное растрескивание, образование протяженных треков. Значительно легче, из-за большой дефектности, разрушается поверхность оптических деталей. Входная поверхность оплавляется, растрескивается, испытывает тепловой ожог. Разрушение выходной поверхности носит «взрывной» характер, сопровождается выкалыванием части материала и образованием глубоких трещин, радиально расходящихся от области повреждения.

Диэлектрическое покрытие на стеклянной подложке представляет сложную, часто многослойную, систему чередующихся пленок из многокомпонентных веществ, имеющих аморфную или кристаллическую структуру. Естественно, что такая система будет обладать пониженными термомеханическими характеристиками и еще больше увеличивать дефектность границы раздела, тем самым, определяя максимальную интенсивность излучения, проходящего через элементы силовой оптики. Оптические покрытия имеют и иную морфологию разрушения; вспучивание отдельных участков в облучаемой зоне, отслоение, растрескивание, послойное разрушение.

Металлические пленки на стекле под действием лазерного импульса плавятся, испаряются, скатываются к краям облучаемой зоны.

Порог разрушения оптических материалов зависит от множества факторов, определяемых свойствами этих материалов, а также от режима

работы лазера: длительности импульса, размера облучаемой зоны, распределения энергии по сечению пучка, длины волны генерации и т.д. Поэтому, при контроле лучевой прочности оптических материалов, помимо критерия разрушения и величины порога разрушения, необходимо также указывать экспериментальные условия, при которых измерялся порог разрушения. Основными факторами, влияющими на порог разрушения многослойных диэлектрических систем, являются начальное поглощение и усугубляющее его рассеяние света в системе, т.е. те общие энергетические потери излучения, которые приводят к «запуску» того или иного механизма разрушения. В настоящее время общепризнанным механизмом разрушения (по крайней мере, в микро - миллисекундном диапазоне длительности лазерного воздействия) является механизм, обусловленный поглощением энергии лазерного излучения слоями с последующим тепловым разрушением системы.

Под лучевой (световой) прочностью понимают пороговую плотность мощности или энергии лазерного излучения, при которой происходит изменение оптических свойств детали, и появляются видимые разрушения на ее поверхности.

Для количественной характеристики величины порога лазерного разрушения обычно используют пороговые или средние значения плотности энергии (мощности) при определенном выборе критерия разрушения и измерении параметров светового импульса, приводящего к разрушению. На практике в качестве критерия разрушения чаще всего выбирают появление яркой вспышки у поверхности образца, связанной с возникновением плазмы, так как это почти всегда соответствует наличию повреждений, видимых невооруженным глазом или в микроскоп. Пороговая плотность энергии H_p и мощности E_p разрушения определяется выражениями:

$$H_p = \frac{W_n}{S_{\text{экв.}}} \quad ; \quad E_p = \frac{H_p}{t_B} ,$$

где W_n – пороговая энергия (часть энергии импульса, выделившаяся к моменту разрушения), Дж; $S_{\text{экв.}}$ – эквивалентная площадь воздействия, т.е. площадь эквивалентного светового пятна с равномерным распределением освещенности, равным максимальной освещенности в реальном пятне, см^2 ; t_B – время воздействия, т.е. время от начала импульса до момента разрушения, с.

Средняя плотность энергии и мощности:

$$\bar{H}_p = \frac{W_n}{S_{\text{экв.}}} \quad ; \quad \bar{E}_p = \frac{H_p}{t_{0,5}} ,$$

где W_n – пороговая энергия лазерного импульса, Дж; $t_{0,5}$ – полуширина лазерного импульса, т.е. его длительность на уровне 0,5 максимального значения мощности, с.

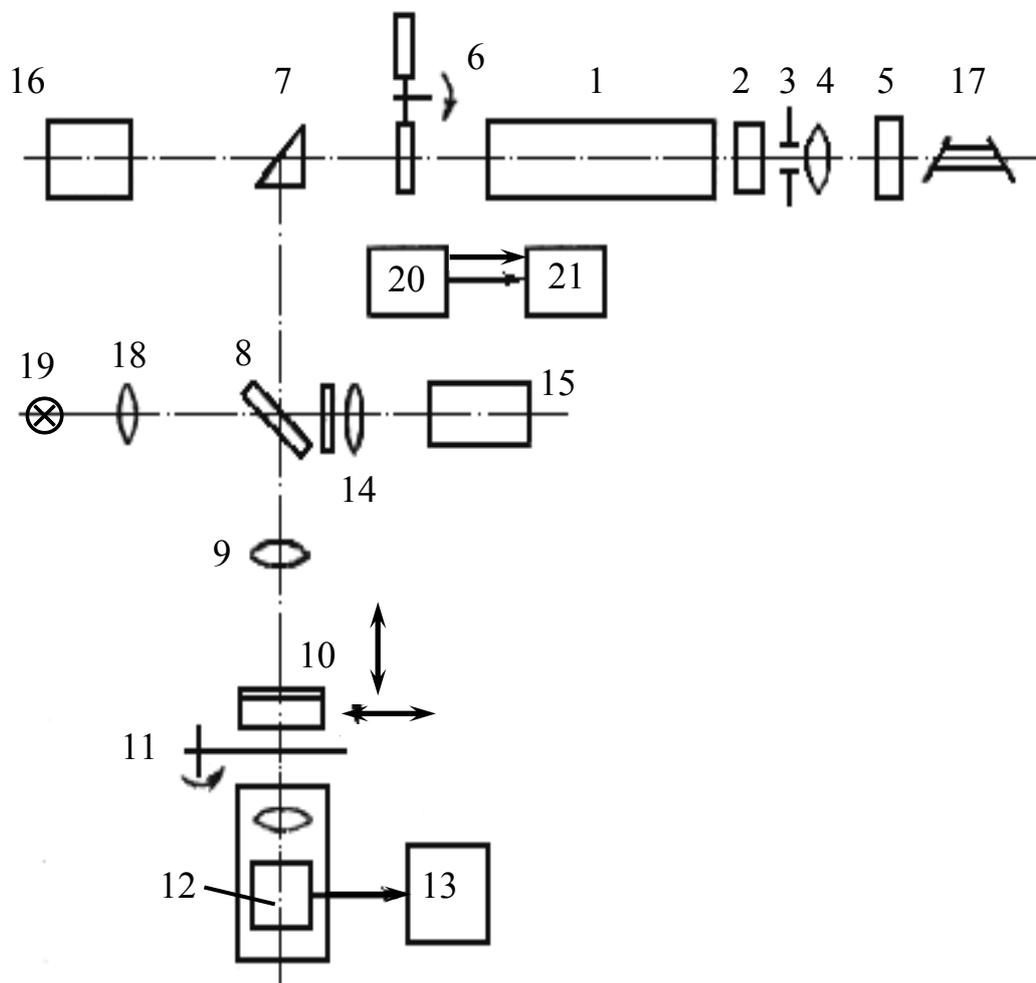


Рис. 4

Описание установки

Мощное излучение, создаваемое лазером 1 (лазера на рубине или стекле с неодимом), работающем в режиме свободной генерации или модулированной добротности (при введенном модуляторе 2), направляется призмой 7 на линзу 9, в фокальной плоскости которой установлена контролируемая поверхность образца 10 (рис. 4). Фокусным расстоянием линзы, качеством ее изготовления и расходимостью лазерного излучения определяется площадь облучения контролируемой поверхности.

Часть энергии излучения параллельной стеклянной пластинкой 8 и линзой 14 направляется на измеритель энергии лазерного излучения 15 (ИМО-2Н). Дискретное изменение лазерной энергии до величины порога разрушения поверхности образца осуществляется набором калиброванных нейтральных светофильтров 6 на турели, установленной у выходного зеркала лазера.

Форма лазерного импульса контролируется при помощи фотоприемника 20 и запоминающего осциллографа 21.

Для наблюдения за появлением на поверхности покрытия используется микроскоп с телекамерой 12, установленный за образцом. Зона воздействия наблюдается на мониторе 13 увеличением $200\times$. Защита микрообъектива микроскопа во время воздействия лазерного импульса на образец осуществляется экраном 11. Подсветку зоны воздействия для надежной работы телекамеры обеспечивает осветитель 18, 19. Для создания более равномерного распределения энергии по сечению пучка между задним зеркалом 5 лазера и активным телом устанавливается диафрагма 3 и длиннофокусная линза 4.

Юстировка

Для облегчения юстировки измерительной установки и визуализации зоны воздействия за задним зеркалом облучающего лазера устанавливается гелий-неоновый лазер ЛГ-66.

Юстировочными приспособлениями лазера ЛГ-66 добиваются того, чтобы его луч проходил через центры диафрагм, установленных на торцы активного элемента и попадал на образец.

Юстировка облучающего лазера осуществляется с помощью автоколлиматора 16. При этом 2, 3, 4, 6 и 7 выводят из оптической схемы и зеркала лазера и торцы активного элемента выставляются параллельно друг другу.

После этого производится облучение фотобумаги, установленной в плоскости образца. При качественно выполненной юстировке зона разрушения на бумаге должна совпадать с пятном от лазера ЛГ-66.

Дальнейшая юстировка всех элементов схемы производится по лучу лазера. Образец в оправе устанавливается так, чтобы его поверхность была перпендикулярна оптической оси, и луч лазера проходил через центр образца.

Содержание работы

В процессе выполнения работы необходимо отъюстировать оптическую схему и облучающий лазер, определить длительность лазерного импульса и эквивалентную площадь воздействия, измерить лучевую прочность в пяти зонах на поверхности оптической детали.

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Подготовка системы контроля длительности лазерного излучения

1.1. Включить шнуры питания компьютера, монитора и осциллографа (осциллограф присоединяется к блоку питания через шнур со штекером.).

1.2. Соединить осциллограф с параллельным портом компьютера, имеющимся кабелем.

1.3. Присоединить вход первого канала осциллографа **CH1** к фотодиоду с помощью коаксиального кабеля с разъемом.

1.4. Включить компьютер и монитор, запрос «Администратор» отменить.

1.5. Включить осциллограф, выбирая на компьютере с помощью мыши последовательно «ПУСК» - «ПРОГРАММЫ» - «Pc-Lab2000» - «Pc_Lab2000».

1.6. Установить осциллографический режим работы прибора, выбирая мышью **PCS500 – ОК**.

1.7. Оперирова кнопками на экранной панели осциллографа с помощью мыши настроить режимы:

а) Отключить второй канал осциллографа, отжав кнопку **CH2**;

б) Установить цену деления по осям: вертикальной (чувствительность) и горизонтальной (скорость развертки) $0,15V$ и $2ms$ соответственно;

в) На панели запуска развертки **Trigger** установить уровень срабатывания запуска (**Level**) вблизи половины деления (красный маркер уровня движется слева от оси ординат), определить первый канал как источник сигнала запуска (нажать **CH1** в строке **Source**) и включить систему запуска, выбрав **ON** в окошке **On-Off**;

г) Включить развертку кнопкой **RUN** (непрерывная развертка после запуска) или **SINGLE** (однократная развертка).

Если до записи сигнала фотодиода от лазерного импульса произойдет срабатывание (запуск развертки) и запись значительного сигнала помехи (больше половины вертикального деления шкалы), оперирова командами **RUN**, **On-Off**, **Level** (а также заземляя вход кнопкой **GND** в группе кнопок **Coupling** в нижней части экрана) очистить экран и снова привести осциллограф в состояние готовности к записи полезного сигнала.

Обработка записанного сигнала

1. В меню **View** выбрать опцию **Markers**. На экране появится две пары штриховых линий - маркеров.

2. Перетаскивая с помощью левой кнопки мыши нижний горизонтальный маркер (в этот момент линия становится сплошной), совместить его с нулевой линией шкалы.

3. Левый вертикальный маркер совместить с началом записи импульса (для этого может понадобиться перемещение всей записанной картинке с помощью прокрутки, имеющейся под экраном).

4. Верхний маркер совместить с верхней точкой записи и прочитать в нижней части экрана **dV**: – разность высот двух маркеров, т.е. полную амплитуду импульса.

5. Установить верхний маркер на половинную величину амплитуды (следя за величиной **dV**;) и подвести правый маркер к точке пересечения верхнего маркера с линией сигнала.

6. Прочитать в нижней части экрана величину **dt**: – промежуток времени, соответствующий разности позиций вертикальных маркеров, т.е. длительность импульса, считаемая от его начала до спада к уровню, равному половине амплитуды.

7. В необходимых случаях полная информация о записанном импульсе может быть сохранена в виде черно - белого изображения (формат **bmp**, команда **File - SaveImage**) или в цифровой форме.

2.Измерение энергии лазерного излучения

2.1.Тумблер на передней панели блока индикации измерителя энергии лазерного излучения ИМО-2Н поставить в положение «СЕТЬ», при этом должна загореться индикаторная лампочка.

2.2.Снять крышку с окна измерительной головки.

2.3.После прогрева прибора в течение 30 мин. Поставить переключатель рода работ в положение «МОЩНОСТЬ» в режиме измерения и выставить нуль прибора ручкой «УСТАНОВКА НУЛЯ» на самом чувствительном пределе 0,001Вт (0,01Дж).

2.4.Произвести калибровку прибора. Для этого, переключателем диапазона измерения выставить диапазон «0,01Вт» (0,1Дж). При калибровке по энергии установить переключатель рода работ в положение «ЭНЕРГИЯ» в режиме калибровки. Нажать кнопку «КАЛИБРОВКА». Если максимальное отклонение стрелки равно $100\pm 0,5$ дел., процесс калибровки выполнен. В противном случае выставить стрелку прибора на $100\pm 0,5$ дел. ручкой «УСИЛЕНИЕ, Дж».

2.5.Установить переключатель рода работ в положение «ЭНЕРГИЯ» в режиме измерения, переключателем диапазона измерения выставить предполагаемый предел измерения (указывается преподавателем). Прибор готов к работе.

3. Измерение эквивалентной площади воздействия

Провести юстировку облучающего лазера при помощи автоколлиматора и оптической схемы по лучу гелий-неонового лазера.

Установить в плоскость образца фотобумагу.

.Установить турель в положение свободное от нейтральных фильтров.

Включить тумблер «СЕТЬ» на блоке управления лазера, при этом должна загореться сигнальная лампа.

Нажать кнопку «ПУСК», при этом должна загореться лампа «НАКАЧКА». При достижении стрелки киловольтметра значения 4,75кВ нажать кнопку «СТОП», при этом лампа должна погаснуть.

Оповестить громким голосом всех находящихся в лаборатории людей: «Внимание: раз, два, три» и нажать кнопку дистанционного управления «ПОДЖИГ».

Измерить диаметр зоны разрушения на фотобумаге с помощью измерительного микроскопа и рассчитать эквивалентную площадь воздействия.

4.Проведение измерения

4.1.Поместить контролируемое зеркало в оправу и юстировочным винтом установить его перпендикулярно оптической оси.

4.2. Включить осветитель микроскопа, монитор и сфокусироваться на контролируемую поверхность.

4.3.Перед выходным зеркалом лазера установить по нормали к оптической оси нейтральный светофильтр №20 с минимальным пропусканием на длине волны генерации лазера (~3%).

4.4.Повторить пункты 3.5 и 3.6.

4.5.После «выстрела» снять показания $W_{и}$ с индикатора измерителя энергии и мощности лазерного излучения ИМО-2Н.

4.6.Вывести защитный экран перед объективом микроскопа и проконтролировать по монитору зону облучения. Если разрушения не произошло, то установить на турели следующий светофильтр с большим пропусканием на величину шага ряда светофильтров и ввести защитный экран.

4.7.Через 3 мин. повторить п.4.4...4.6 и т.д.

4.8.Если наступило разрушение ($W_{и}^*$), то необходимо подвести следующую зону по диаметру зеркала и повторить п. 4.4...4.6.

4.9.Определив энергию импульса, при которой произошло разрушение ($W_{и}^p=W_{и}^* \tau$, где τ - пропускание оптической системы) для всех пяти зон образца, рассчитать средние плотности энергии и мощности разрушения, определив по экрану осциллографа полуширину лазерного импульса $t_{0,5}$. Данные свести в таблицу.

Указания по технике безопасности

При работе на установке существуют два вида опасности: световое излучение большой интенсивности и электрический ток.

Источником интенсивного светового излучения является головка генератора, источником электрической опасности – пульт управления, блоки конденсаторов, соединительные кабели, головка генератора.

Запрещается смотреть прямо на луч лазера или зеркальное отражение луча, а также осуществлять визуальный контроль попадания излучения на объект в момент генерации без применения средств защиты глаз.

В нерабочем состоянии выходное отверстие головки лазера должно быть закрыто заглушкой.

Необходимо помнить, что в блоках конденсаторов, оптической головке, пульте управления имеется постоянное напряжение 15кВ.

После отключения касаться блоков конденсаторов не разрешается в течение 5 мин.

Электрическая безопасность лазера обеспечивается действием блокировок при снятии крышек с блоков конденсаторов и крышки с оптической головки, наличием световой сигнализации о включении лазера, отсутствием возможности повторного включения питания.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Основные определения и цель работы.
2. Схему установки для определения лучевой прочности оптических покрытий.
3. Таблицу измеренных значений пороговой энергии и рассчитанных значений плотности энергии и мощности для всех проконтролированных зон оптического покрытия.
4. Величину средней лучевой прочности оптического элемента.

Контрольные вопросы

1. Чем вызвана необходимость контроля лучевой прочности покрытий?
2. Факторы, влияющие на лучевую прочность оптических покрытий.
3. Сущность методики разрушающего контроля лучевой прочности оптических покрытий.
4. Чем определяется погрешность измерения величины пороговой плотности мощности излучения?

Список литературы

1. Ради Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.; Мир, 1974.
2. Алешин И.В., Имас Я.А., Комолов В.Л. Оптическая прочность слабопоглощающих материалов. – Л.: ЛДНТП, 1974.
3. Окатов М.А., Поплавский А.А., Таганова В.А. Неразрушающие методы контроля поверхностной лучевой прочности оптических элементов лазера // Оптико-механическая промышленность. – 1983. - №1. – С.49-54.
4. Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф. Способ определения лучевой прочности оптических покрытий. – А.с. СССР №1370531 от 1.10.87.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы: определить механическую прочность оптических покрытий, изготовленных методами термического, электронно-лучевого или лазерного испарения веществ в вакууме.

Технико-эксплуатационными характеристиками интерференционных оптических покрытий являются:

1. Оптические спектральные характеристики.
2. Влагостойкость.
3. Механическая прочность.
4. Термическая прочность.
5. Химическая устойчивость.
6. Лучевая прочность.
7. Радиационная стойкость.
8. Другие (электропроводность, поляризация, стабильность характеристик во времени).

Технические требования.

1. Покрытия должны соответствовать требованиям ОСТЗ-1901-85 и наноситься на оптические детали по технологии, утвержденной в установленном порядке.

2. Класс чистоты поверхностей оптических деталей с нанесенными покрытиями следует установить по ГОСТ 11-41-76. Покрытия не должны снижать чистоту поверхности деталей более, чем на 2 класса.

3. Покрытия должны быть устойчивы к органическим растворителям, применяемым при чистке оптических деталей по нормативно-технической документации.

Покрытия из органических полимеров должны быть устойчивы к спирту и спирто-эфирным смесям.

4. По влагоустойчивости следует установить группы:

1. относительная влажность 95-98%, при $t 40 \pm 2^\circ\text{C}$;
2. относительная влажность 83-85%, при $t 25 \pm 2^\circ\text{C}$;
3. относительная влажность 55-60%, при $t 25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Механическая прочность во многом определяет долговечность различных оптических покрытий, а для оптико-электронных приборов это имеет очень важное значение. Оптические и оптико-электронные приборы в условиях эксплуатации подвергаются повышенным механическим нагрузкам. При таких нагрузках оптические детали с нанесенным на них покрытиями постепенно разрушаются, поэтому актуальной становится проблема упрочнения оптических материалов из которых изготовлена система.

Для оптических покрытий, контактирующих с внешней средой, механическая прочность является важной эксплуатационной характеристикой.

5. По механической прочности устанавливаются следующие группы:

«0» - покрытие допускает чистку батистовой салфеткой с применением спирта и выдерживают не менее 3000 об. на приборе СМ-65.

Прибор СМ-65 представляет собой центрифугу, в которой размещена деталь, и мягкий резиновый наконечник, обмотанный бинтом, на который давит груз 200 г. Наконечник соприкасается с деталью и по форме следа от контакта и в зависимости от количества оборотов детали судят о механической прочности.

К «1» группе относятся те, которые допускают чистку салфеткой и выдерживают не менее 2000 об.

К «2» группе относятся те, которые допускают чистку салфеткой и выдерживают не менее 1000 об.

К «3» группе относятся покрытия, которые выдерживают чистку ватным тампоном, смоченным спиртом с минимальным применением силы.

К «4» группе относятся покрытия, не допускающие ни один вид чистки и никаких механических воздействий.

Долговечность различных оптических покрытий для оптико-электронных приборов имеет очень важное значение. Оптические и оптико-электронные приборы в условиях эксплуатации подвергаются повышенным механическим нагрузкам. При таких нагрузках оптические детали с нанесенным на них покрытиями постепенно разрушаются, поэтому актуальной становится проблема упрочнения оптических материалов из которых изготовлена система.

Для оптических покрытий, контактирующих с внешней средой, механическая прочность является важной эксплуатационной характеристикой. Важнейшими экспериментально определяемыми параметрами механической прочности покрытия является адгезионная прочность, микротвердость и износостойкость покрытия. Первая определяется силами сцепления с подложкой (адгезией) и силами связи частиц самого покрытия (когезией), знание которых позволяет найти величину прочности. Эти силы измеряются путем отрыва покрытия от подложки и разрыва покрытия, отделенного от подложки. Для тонких оптических пленок, прочно закрепленных на стекле, эти методы не пригодны. Для измерения адгезии используется нанесение на пленку царапин, испытание на истирание, ультразвуковая вибрация и сверхцентрифугирование.

Контроль прочности методом истирания дает суммарный эффект когезии и адгезии и является мерой износа покрытия. Поэтому практическая пригодность любого покрытия определяется этим методом. Прочность при

истирании измеряется на приборе СМ-55 с точностью $\pm 10\%$. За величину прочности принимается число оборотов до появления кольцевой царапины, видимой невооруженным глазом, при нагрузке на тендер 200г и скорости вращения образца 500об/мин.. Прочность покрытия зависит от следующих факторов: химического состава, толщины, температуры прогрева и способа нанесения пленки, а также от химического состава стекла подложки.

1. Зависимость прочности покрытия от его химического состава. Наибольшую прочность имеют пленки SiO_2 , наименьшую TiO_2 . В табл. 1 представлены значения механической прочности при истирании пленок толщиной 100нм, нанесенных на стекло К8 и прогретых при 300°C [1].

2. Зависимость прочности покрытия от состава стекла подложки. Покрытия на химически устойчивых стеклах с большим содержанием двуокиси кремния имеют высокую прочность. Значения механической прочности пленок SiO_2 толщиной 100нм, прогретых при 350°C представлены в табл. 2.

Таблица 1

Покрытие	SiO_2	TiO_2	HfO_2	ZrO_2	Bi_2O_3	TiO_2	Просветление 2-слойное TiO_2 , SiO_2 3-слойное ($\text{TiO}_2+\text{SiO}_2$), TiO_2 , SiO_2 6
Количество оборотов $\times 10^3$	35	0,4	6	4	2	8	

Таблица 2

Стекло	Кварц	К8	ЛК5	ЛФ	ТК14	СТК7	ОФ4
Хим. устойчивость	уст.	уст.	уст.	уст.	неуст.	неуст.	неуст.
Количество оборотов $\times 10^3$	30	35	28	20	4	3	2

Таблица 3

Стекло	Ф2	ТФ3	ТФ5
Хим. устойчивость	Мягкие стекла		
Количество оборотов $\times 10^3$	6	4	5

3. Зависимость прочности покрытия от его толщины. Прочность пленок монотонно убывает с увеличением их толщины. Это обусловлено различием структуры пленки и поверхности стекла. При малых толщинах пленка эластична, имеет островковую структуру и следует за структурой поверхности. При утолщении усиливается тенденция пленки строить

собственную структуру, в общем отличающуюся от структуры поверхности стекла. Однако сила адгезии, препятствует такой тенденции и в пленке возникают большие внутренние напряжения, понижающие ее прочность.

4. Зависимость прочности покрытия от способа нанесения.

При получении толстых пленок используют многократное их наслаивание двумя способами: наносят или небольшое число сравнительно толстых пленок из концентрированных растворов, или большое число тонких слоев из разбавленных растворов. Покрытия из тонких пленок имеют в 1,5 раза более высокую прочность. Тонкий слой, будучи эластичным, не вызывает заметных напряжений на границе слоев, где наблюдается наименьшая прочность, определяющая прочность всего покрытия при нанесении толстых слоев, вызывающая на границе напряжения, снижает прочность покрытия.

Для обеспечения вращения образца 7 с нанесенным покрытием, установленного в оправу 5, используется двигатель 11, который крепится к столу микроскопа 1 (МИМ-2) с помощью кронштейна. Микроскоп 1 используется для наблюдения за разрушением покрытия образца 7 при визуальном контроле. На валу двигателя укреплен ролик для подачи вращения на оправу 5 с образцом. Передача вращательного движения осуществляется посредством резинового пассика 12.

По стойке 13, укрепленной на основании микроскопа 1, свободно перемещается кронштейн 6, который обеспечивает постановку на образец 7 истирающего тендера 2 с резиновым наконечником 4, который перед процессом истирания обертывается материей. Тендер 2 нагружается грузом 3 и все в сумме дает массу 200г.

Для лучшей установки тендера 2 на образец и наблюдения через микроскоп, оправка 5, прикрепленная к столу микроскопа, может перемещаться вместе со столом микроскопа в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В установке используется система контроля, которая осуществляет счет числа оборотов, и представляет собой оптронную пару, состоящую из лампы накаливания 9, линзы 9* и фотодиода 8. Лампа накаливания 9, крепится под оправой 5 с образцом 7 к основанию микроскопа 1. Излучение от источника света фокусируется линзой 9* через образец 7 на фотодиод 8, расположенный над оправой. Фотодиод преобразует энергию света в электрическую и передает сигнал на мультиметр Ф4800 поз.10, который является счетчиком числа оборотов с момента нажатия кнопки «СТАРТ» до остановки счета.

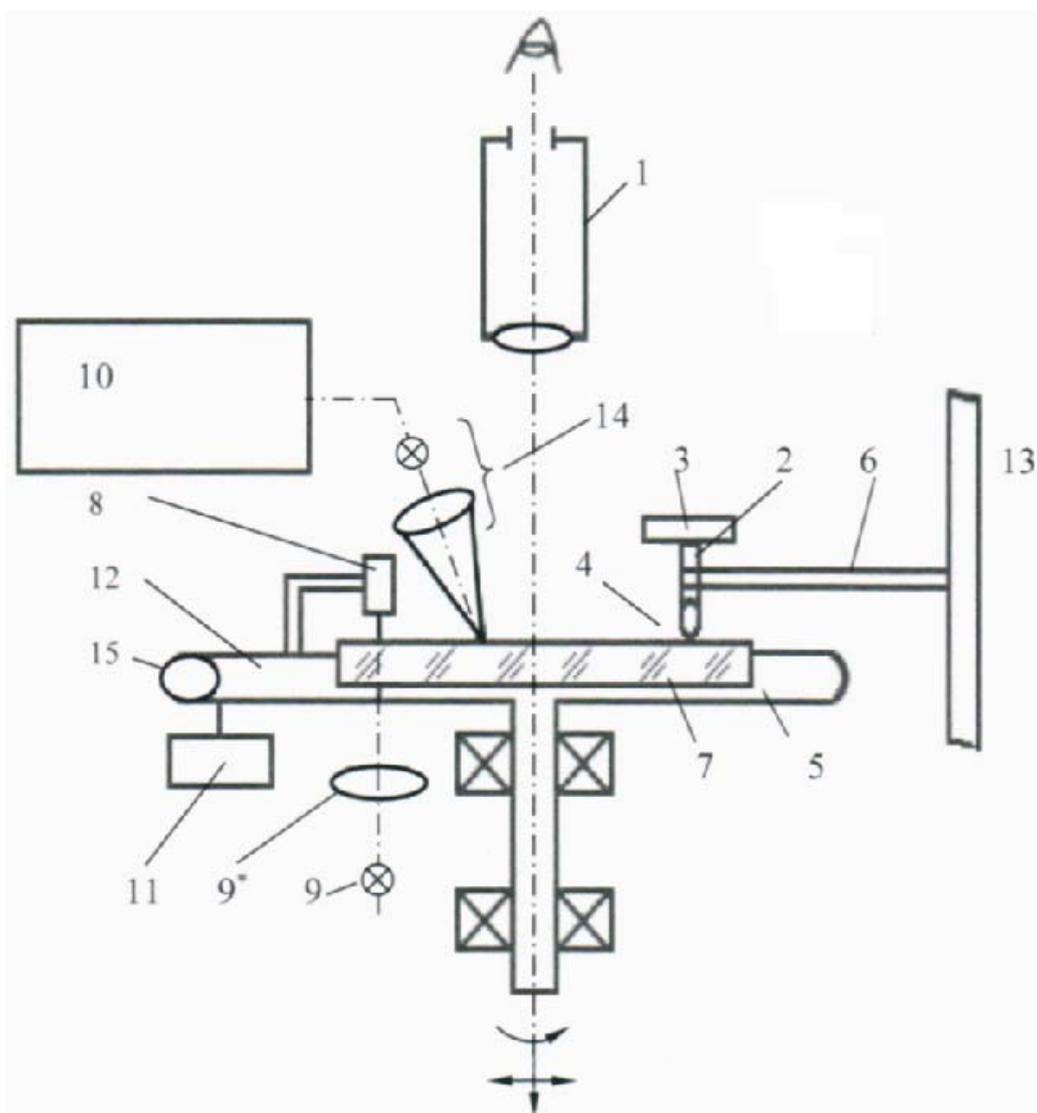


Рис. 5. Схема лабораторной установки контроля механической прочности оптических покрытий

Порядок выполнения работы

1. Исследуемый образец с нанесенным покрытием (диаметр образца до 60мм) устанавливается в оправу и фиксируется с четырех сторон винтами. Устанавливается фотодиод.

2. Подается напряжение 220В на стабилизированный блок питания и на мультиметр.

3. В данной работе мультиметр цифровой Ф4800 используется для подсчета количества импульсов (N). В режиме счета импульсов переключатель рода работ находится в положении N (N является результатом измерений).

3.1.К разъему «ftN» подключается цепь, в которой необходимо подсчитать импульсы;

3.2. Включается соответствующая полярность сигнала кнопкой переключателя «ПОЛЯРНОСТЬ».

3.3. Устанавливается переключатель «РОД РАБОТ» в положение «N».

3.4. Устанавливается потенциометр «Время инд.» в крайнее левое положение (режим ручного поиска), нажимается кнопка «ПУСК». Прибор подсчитывает количество импульсов в интервале времени между нажатием «СТАРТ» и автоматической остановкой счета, либо до нажатия кнопки «СТОП» при визуальном контроле.

4. К левому гнезду блока питания (12В) подключается лампа оптронной пары.

5. Резиновый наконечник тендера оборачивается тканью, фиксируется и тендер устанавливается в крайнее положение относительно центра образца. Устанавливается нагрузка на тендере массой в 200г. Подается питание на двигатель от правого гнезда блока питания – 12В. Потенциометром, расположенным на передней панели того же блока питания устанавливается напряжение, при котором оправа с образцом под давлением тендера будет вращаться с частотой 500об/мин.

6. Питание на двигатель подается одновременно с нажатием кнопки «ПУСК» на мультиметре.

7. При появлении царапины, наблюдаемой в микроскоп, необходимо нажать кнопку «Стоп» и снять показания со счетчика мультиметра. Обработать результаты, с учетом деления показаний счетчика на 4.

8. Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

№п/п	Номер образца	Тип покрытия	Материал покрытия	Количество оборотов до разрушения	Группа механической прочности

9. По ОСТ «Оптические покрытия» определить группу по механической прочности и сделать выводы.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и основные определения.
2. Схему установки для контроля механической прочности оптических покрытий.
3. Таблицу измеренных значений механической прочности.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какова природа сил адгезии?

2. Из каких составляющих складываются термонапряжения в пленке?
3. Перечислить методы измерения механической прочности и адгезии тонких пленок.
4. Методы повышения механической прочности тонких пленок.
5. Сущность метода истирания.

Список литературы

1. Технология тонких пленок (Справочник). Под ред. Л.Мейссела, Р.Гленга, М. Машиностроение, 1981г. т.2.
2. Физика тонких пленок. Под ред. Г.Хасса и Р.Э.Туна. М. Изд. Физ-Мат. Литература. 1976г.
3. Комраков Б.Н., Шапочкин Б.А. Измерение параметров оптических покрытий. – М.: Машиностроение, 1986.- 131с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

КОНТРОЛЬ СВЕТОРАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы: Изучение метода контроля энергетических потерь излучения на рассеяние и поглощение оптических покрытий.

Энергетические потери излучения за счет светорассеяния в оптических покрытиях приводят к уменьшению спектральных коэффициентов пропускания и отражения. Источниками пассивных потерь (светорассеяния) являются: шероховатость подложки, шероховатость границ раздела тонких пленок, различного рода, поглощающие и не поглощающие включения и неоднородности, микротрещины, пустоты и т.д..

Т.е. всегда будет иметь место рассеяние на этих дефектах, которые приводят к отклонению волнового фронта. Для оптически неоднородных сред интенсивность рассеянного излучения под углом φ на частицах сферической формы можно определить по формуле Релея:

$$I(\varphi) = ANV^2 I_0 \frac{1 + \cos^2 \varphi}{L^2 \lambda^4} \quad , \quad (5)$$

где N – концентрация молекул в данном объеме V ,

I_0 – интенсивность падающего излучения,

λ - длина волны падающего излучения,

L – расстояние от рассеивающего объема V до плоскости наблюдения.

Для оптически чистых материалов, в которых нет неоднородностей, интенсивность рассеянного излучения будет определяться флуктуациями диэлектрической проницаемости и показателя преломления среды, так называемое – молекулярное рассеяние. Интенсивность рассеянного света под углом φ может быть определена по формуле:

$$I(\varphi) = 2\pi^2 kT\beta\rho N \left(\frac{\partial N}{\partial \lambda} \right) I_0 \frac{1 + \cos^2 \varphi}{L^2 \lambda^4} \quad , \quad (6)$$

где k - постоянная Больцмана,

T - абсолютная температура,

β - термодинамический коэффициент сжимаемости среды,

ρ - плотность среды,

N - концентрация молекул.

Для электрически изотропных молекул эта зависимость наблюдается только тогда, когда размеры дефектов много меньше длины волны

падающего излучения. Когда размеры дефектов сравнимы с длиной волны будет наблюдаться дифракция. Чем больше размер неоднородности, тем больше будет нарушаться зависимость

$$I(\varphi) \approx \frac{1}{\lambda^m}, \quad (7)$$

где $m < 4$.

Рассеяние «вперед» преобладает над рассеянием «назад» (закон «Ми»), т.е. практически необходимо измерять индикатрису рассеяния и по ней судить о коэффициенте рассеяния.

Описание установки

В многослойных диэлектрических системах при фиксированной длине волны падающего со стороны подложки излучения определенной поляризации существуют оптимальные по чувствительности к поглощению углы падения. В этом случае распределение в пространстве интенсивности излучения, прошедшего через границу раздела оптическое покрытие – воздух за счет нарушения полного внутреннего отражения, несёт информацию о дефектности этой границы и рассеивающих свойств покрытия.

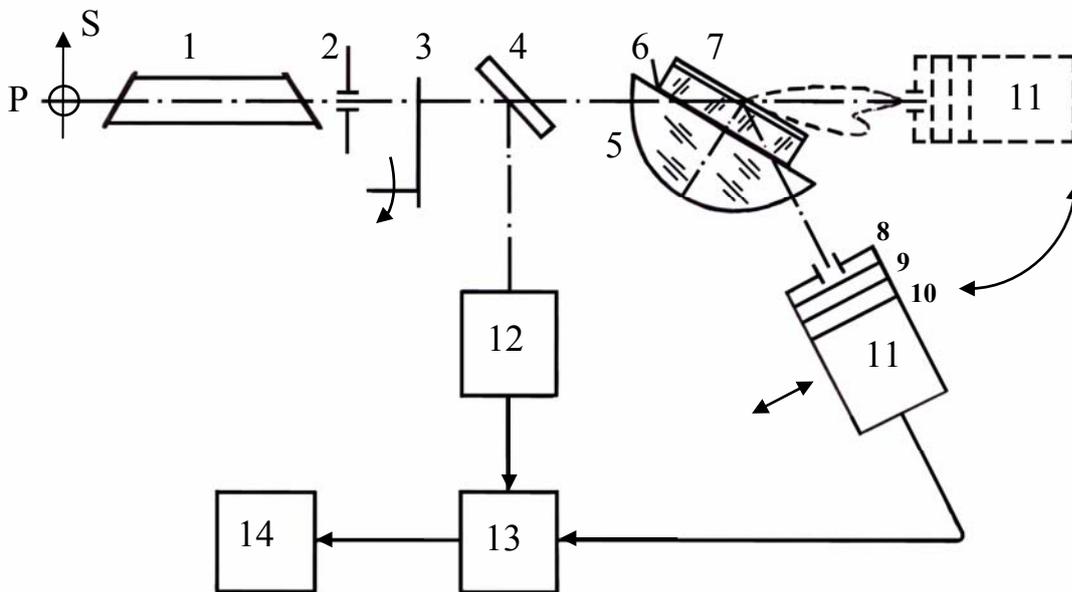


Рис. 6

Так как в этом случае энергетический коэффициент пропускания равен нулю, то по измерению энергетического коэффициента отражения

легко вычислить поглощательную способность из закона сохранения энергии. Для реализации контроля энергетических потерь излучения в оптических покрытиях на поглощение и рассеяние используется гониофотометрическая установка. Схема установки изображена на рис. 6.

Установка позволяет измерять энергетический коэффициент отражения оптического покрытия на длине волны $\lambda=0,6328\text{мкм}$ при практически любых углах падения излучения больших критического.

Для создания явления полного внутреннего отражения используется элемент ввода – плоско-выпуклая цилиндрическая линза 5, на плоскую поверхность которой через иммерсию устанавливается контролируемый образец. ЭВИ крепится на столике гониометра ГС-5, вместо коллиматора и зрительной трубы которого применяется He-Ne стабилизированный по выходной мощности излучения лазер 1 и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) 10. Ось вращения столика гониометра лежит в плоскости оптического покрытия и, таким образом при повороте ФЭУ на заданный угол измерялась зеркально-отражённая составляющая падающего излучения.

Для нормальной работы ФЭУ вводится нейтральный ослабитель 9. Поворотом лазера вокруг оптической оси реализуется необходимое состояние поляризации падающего излучения, часть которого пластиной 4 направляется на фотоприемник 12. Измеритель отношения напряжения 13 выдает на регистратор 14, сигнал, пропорциональный коэффициенту отражения контролируемого образца.

Исследование других зон покрытия осуществляется при его смещении по иммерсии вдоль поверхности линзы.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить блок питания лазера ОКГ-66 тумблером «сеть», прогреть блок питания 5 мин., нажать кнопку «Поджиг» и установить потенциометрами «грубо», «плавно» ток разряда 10мА.
2. Включить высоковольтный источник питания ФЭУ тумблером «сеть» и переключателем установить входное напряжение 1500В.
3. Включить блок питания модулятора и цифровой вольтметр.
4. Установить контролируемый образец через слой иммерсии на плоскую поверхность ЭВИ.
5. Включить тумблером «сеть» подсветку шкалы гониометра.
6. Выключить освещение в лаборатории и вывести из оптической схемы нейтральный ослабитель 9.
7. Осуществляя поворот алидады гониометра с шагом 5° (показания снимаются с угловой шкалы гониометра), в диапазоне 160° снимать показания с цифрового вольтметра.

8. Данные занести в таблицу.
9. Построить в относительных единицах зависимость интенсивности рассеянного излучения от угла наблюдения.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Основные определения и цель работы.
2. Схему установки для контроля энергетических потерь излучения в оптических покрытиях.
3. Таблицу измеренных значений интенсивности и график индикатрисы рассеянного излучения.
4. Расчет коэффициента светорассеяния «вперед».

Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на светорассеяние оптических покрытий?
2. Чем вызвана необходимость контроля пассивных потерь излучения?
3. Сущность методики контроля светорассеяния.
4. Чем определяется погрешность измерения индикатрисы рассеяния?

Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика, М.- Наука 1976.
2. Комраков Б.М., Шапочкин Б.А. Измерение параметров оптических покрытий. – М.: Машиностроение, 1986. – 131с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

КОНТРОЛЬ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛАХ

Цель работы: изучение метода контроля главных показателей поглощения пленкообразующих материалов, с высоким и низким показателем преломления, входящих в состав многослойного четвертьволнового диэлектрического зеркала.

Опыт работы со спектральными интерференционными и другими устройствами, в оптических схемах которых используются наряду с обычными и мощные лазерные источники излучения, указывает на необходимость проведения изготовителем оптических элементов с покрытием полной аттестации их оптических характеристик. В настоящее время такая аттестация осуществляется частично. Измеряются только энергетические коэффициенты отражения и пропускания в спектральном диапазоне эксплуатации покрытия с минимальной для современных спектрофотометров погрешностью $\pm 0,5\%$. Оценить малые энергетические потери (коэффициент поглощения), которые определяются главными показателями поглощения пленкообразующих диэлектрических материалов, просто из закона сохранения энергии не представляется возможным. Наличие малого поглощения в диэлектрических оптических материалах и пленкообразующих веществах оптических покрытий может приводить к значительному увеличению отражательной способности оптических деталей.

Так для одной идеальной границы раздела (без учета шероховатости) воздух (n_0) и поглощающего материала (n_2) с главным показателем поглощения (χ_2) коэффициент отражения при падении излучения по нормали (рис. 7) будет определяться по формуле:

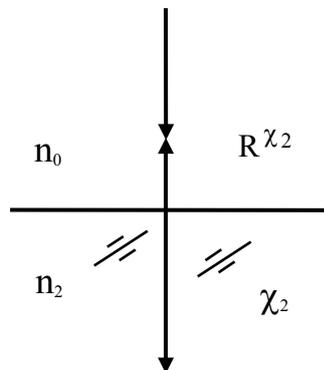


Рис. 7

$$R_{\chi_2} = \frac{(n_0 - n_2)^2 + \chi_2^2}{(n_0 + n_2)^2 + \chi_2^2} = R_{\chi_2=0} \left[1 + \frac{4n_0 n_2 \chi_2^2}{(n_0^2 - n_2^2)^2} \right] = R_{\chi_2=0} \left[1 + \frac{T_{\chi_2=0}}{(n_0 + n_2)^2} \chi_2^2 \right]. \quad (8)$$

Таким образом, отражение будет увеличиваться по сравнению с непоглощающей средой ($R^{\chi_2=0}$) пропорционально квадрату главного показателя поглощения.

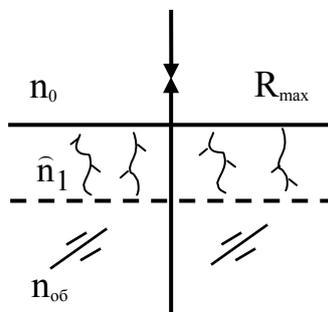


Рис. 8

Если представить реальную границу раздела с трещиноватым поглощающим слоем с $\hat{n}_1 = n_{06} + \chi_1$, где n_{06} – показатель преломления объема материала (рис. 8), то коэффициент отражения (R_{\max}) можно вычислить, если $n_1 d_1 = \frac{\lambda_0}{4}$, по формуле:

$$R_{\max} = \left(\frac{\hat{n}_1^2 - n_0 n_{06}}{\hat{n}_1^2 + n_0 n_{06}} \right)^2 = \left[\frac{(n_{06} + \chi)^2 - n_0 n_{06}}{(n_{06} + \chi)^2 + n_0 n_{06}} \right]^2 = \dots = R_{06} \left(1 + \frac{8\chi n_0}{n_{06}^2 - n_0^2} \right), \quad (9)$$

$$\frac{R_{\max}}{R_{06}} = 1 + \frac{8\chi n_0}{n_{06}^2 - n_0^2} \cong 1 + 6\chi, \quad (10)$$

при $n_0=1$, $n_{06}=1,5$, $\chi=10^{-3}$ коэффициент отражения увеличивается на 0,6%.

При $\chi=10^{-2}$ поглощательная способность увеличивается на порядок, и отражение составляет уже значительную величину – 6%.

Энергетический коэффициент отражения однослойного и, тем более, многослойного покрытия – есть функция многих переменных $R = f(n_0, n_2, n, \chi, nt\dots)$.

Раскладывая функцию в ряд Тейлора, получим:

$$R = R(n^0, 0) + \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial R}{\partial \chi_j} \right)_{\chi_j=0} \Delta \chi_j + \frac{\partial R}{\partial (n_j t_j)_{n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}}} \Delta n_j t_j + \left(\frac{\partial R}{\partial n_j} \right)_{n_j=n^0} \Delta n_j + \dots \quad (11)$$

Если $n_j = \text{const}$, $n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}$, а поглощение в слоях примерно одинаково, то область максимальной чувствительности измерения поглощения есть:

$$\frac{\Delta R}{R(n^0, 0)} = \frac{1}{R(n^0, 0)} \left(\frac{\partial R}{\partial \chi_j} \right)_{\chi_j=0} \Delta \chi_j + \frac{1}{R(n^0, 0)} \frac{\partial R}{\partial (n_j t_j)_{n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}}} \Delta n_j t_j. \quad (12)$$

Данная формула справедлива и для многослойных систем, если принять, что толщины слоев меняются одновременно. Оптическая толщина слоя не обязательно должна быть равна $\frac{\lambda_0}{4}$, а может принять любое фиксированное значение.

Результаты расчётов для семислойного четвертьволнового ($\lambda_0 = 0,6943\text{мкм}$) зеркала представлены на рис. 3. Видно, что в побочных экстремумах отражения $\left| \frac{\partial R}{\partial(n_j t_j)} / R \right| \rightarrow 0$, а $\left| \frac{\partial R}{\partial \chi} / R \right|$ достигает максимума, причём наибольшую величину имеют нечётные (особенно первый) экстремумы.

Важно, что именно в этих спектральных зонах фазовая толщина системы кратна π . Следовательно, формулу (5) можно переписать в виде:

$$\frac{\Delta R}{R(n^0, 0)} = \frac{1}{R(n^0, 0)} \left(\frac{\partial R}{\partial \chi} \right) \Delta \chi. \quad (13)$$

Тогда, областями максимальной чувствительности измерения энергетических потерь излучения на поглощение, являются области побочных экстремумов отражения.

Проведенный анализ спектральных зависимостей показал, что оптимальной по чувствительности к поглощению метод контроля многослойной диэлектрической системы необходимо выбирать по соотношению относительного изменения коэффициентов отражения и пропускания.

Так, например, для зеркальных систем это области побочных минимумов отражения, где $\left| \frac{\partial R}{\partial \chi} / R \right| > \left| \frac{\partial T}{\partial \chi} / T \right|$, (14)

а для просветляющих систем, наоборот области максимумов R , где $\left| \frac{\partial R}{\partial \chi} / R \right| < \left| \frac{\partial T}{\partial \chi} / T \right|$. (15)

Выбор этих длин волн обусловлен необходимостью уменьшения влияния дисперсии показателей преломления и поглощения контролируемых материалов. Если обозначить производные в выражении (16) соответственно F_1, F_2, F_3, F_4 , то после несложных преобразований можно получить:

$$R_1^{\min} = R_1^0 + \left(\frac{\partial R}{\partial \chi_B} \right)_{\lambda=\lambda_1^{\min}} \chi_B + \left(\frac{\partial R}{\partial \chi_H} \right)_{\lambda=\lambda_1^{\min}} \chi_H, \quad (16)$$

$$R_3^{\min} = R_3^0 + \left(\frac{\partial R}{\partial \chi_{B'}} \right)_{\lambda=\lambda_3^{\min}} \chi_{B'} + \left(\frac{\partial R}{\partial \chi_H} \right)_{\lambda=\lambda_3^{\min}} \chi_H,$$

$$\chi_B = \frac{(R_1^{\min} - R_1^0)F_4 - (R_3^{\min} - R_3^0)F_2}{F_1F_4 - F_2F_3}, \quad (17)$$

$$\chi_{B'} = \frac{(R_3^{\min} - R_3^0)F_1 - (R_1^{\min} - R_1^0)F_3}{F_1F_4 - F_2F_3}. \quad (18)$$

Таким образом, измеряя величину коэффициента отражения на двух длинах волн λ_1^{\min} и λ_3^{\min} расположенных в наиболее удобных для регистрации коротковолновой или длинноволновой областях спектра (рис.3) (выбираемой по желанию контролера) относительно длины волны эксплуатации зеркала, и предварительно вычислив величины $R_1^0, R_3^0, F_1, F_2, F_3, F_4$, определяют значения главных показателей поглощения слоев – χ_B и χ_H .

Величины F_1, F_2, F_3, F_4 вычисляются следующим образом: вначале при значениях $\chi_B=0$ и $\chi_H=0$ и $n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}$ вычисляется спектральная зависимость

R_λ^0 , затем при тех же значениях $n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}$ и $\chi_H = \chi_H^1$ и $\chi_B = \chi_B^1$ снова

вычисляется $R_\lambda^{(1)}$, причем $\chi_H^{(1)} \neq \chi_B^{(1)}$ и их значения находятся внутри

контролируемого интервала $\chi \leq (\chi_{j-1} \div \chi_j)$. После этого для $n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}$ и

$\chi_H = \chi_H^1$ и $\chi_B = \chi_B^1$ при условии, что $\chi_H^{(2)} \neq \chi_H^{(1)}$, $\chi_B^{(2)} \neq \chi_B^{(1)}$; $\chi_H^{(2)} \neq \chi_B^{(2)}$.

Вычисляется $R_\lambda^{(2)}$. Из системы уравнений аналогичной (16) находятся соответствующие величины F_1, F_2, F_3, F_4 .

Использование других методов контроля по затуханию интерференционных экстремумов с ростом толщины слоя, измерение коэффициента отражения от покрытой в непокрытой подложки дает или весьма приближенные результаты, или требует специального приготовления исследуемого образца и имеет ограничения чувствительности к изменению χ ($\chi > 5 \cdot 10^{-3}$).

Интересующее нас поглощение на длине волны эксплуатации зеркала (λ_0) при нормальном падении излучения со стороны покрытия находится из выражения

$$A = \left(\frac{\partial A}{\partial \chi_B} \right) \Delta \chi_B + \left(\frac{\partial A}{\partial \chi_H} \right) \Delta \chi_H, \quad (19)$$

где функции $\frac{\partial A}{\partial \chi_B}$ и $\frac{\partial A}{\partial \chi_H}$ вычисляются из заданных n_B и n_H при

$$n_B t_B = n_H t_H = \frac{\lambda_0}{4}. \quad (20)$$

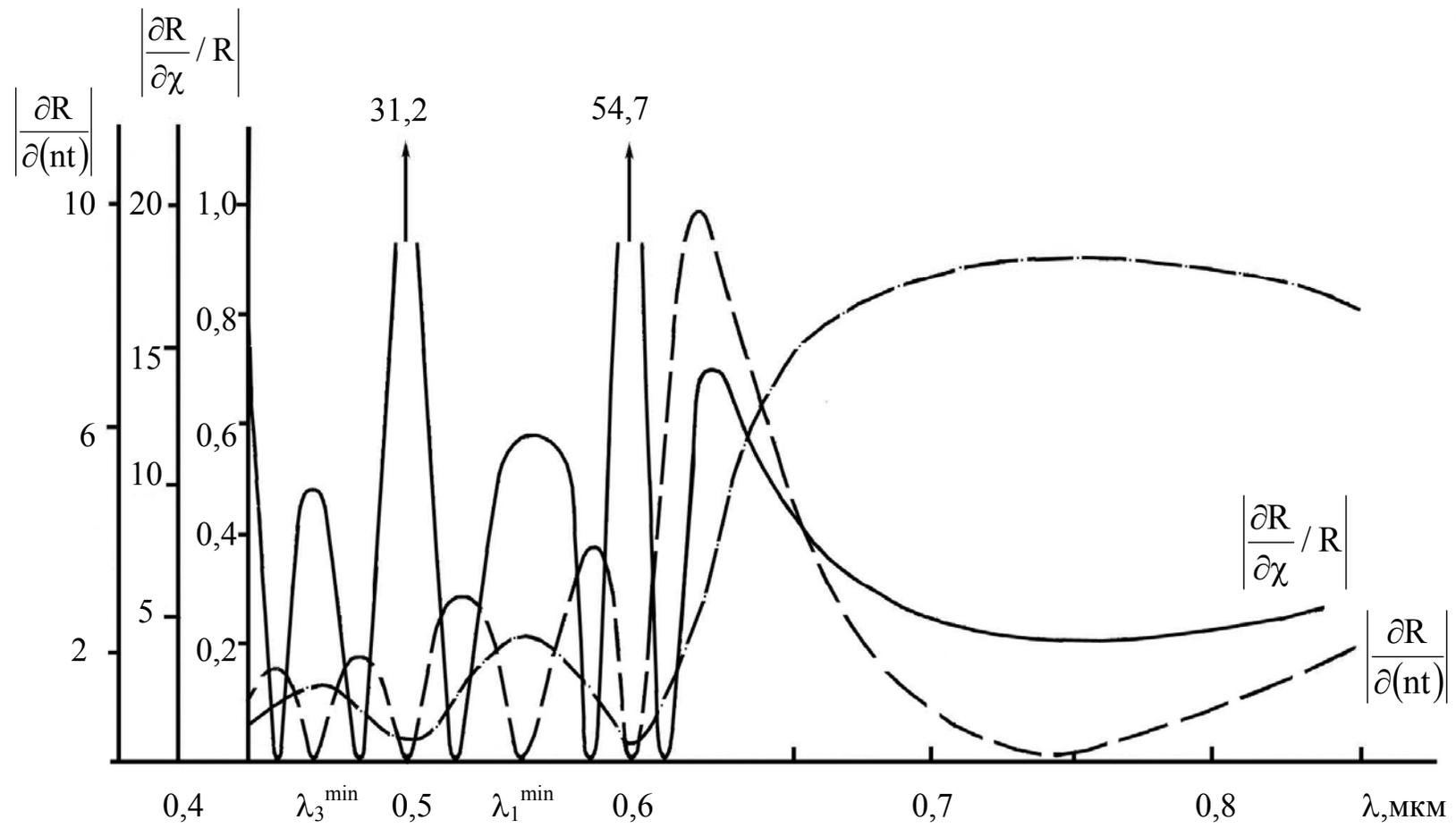


Рис. 9

Содержание работы

1. Измерить величину коэффициента отражения в двух рядом расположенных на шкале длин волн коротковолновых или длинноволновых минимумах спектральной зависимости отражательной способности двух диэлектрических зеркал.

2. Рассчитать по зависимостям 17, 18 главные показатели поглощения пленкообразующих веществ ($\chi_{\text{в}}$, $\chi_{\text{н}}$).

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Подготовить рефлексометр к работе согласно описанию установки.

2. Установить на столик контролируемое зеркало и клинообразную подложку из стекла К8 – эталон и отъюстировать их.

3. Определить спектральную область первого и второго коротковолнового или длинноволнового минимума отражения.

4. Для пяти зон по диаметру зеркала измерить величину R_1^{min} , R_3^{min} , сняв соответствующие значения с цифрового вольтметра (U_1^{R} , U_3^{R} , $U_{\text{ф}}^{\text{R}}$) для каждой зоны покрытия, и рассчитать искомые величины.

5. Рассчитать показатели поглощения пленкообразующих материалов и коэффициенты поглощения на длине максимального отражения зеркала.

6. Величины, R_1^0 , R_3^0 , F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , $\frac{\partial A}{\partial \chi_{\text{в}}}$, $\frac{\partial A}{\partial \chi_{\text{н}}}$ определить из рассчитанных на ЭВМ спектральных зависимостей $R(\lambda)$, $A(\lambda)$ аналогичных по конструкции зеркал при различных комбинациях значений $\chi_{\text{в}}$, $\chi_{\text{н}}$, (зависимости выдаются преподавателем).

7. Рассчитать среднее значение найденных величин и их разброс для контролируемых зеркал $\bar{\chi}_{\text{в}}$, $\bar{\chi}_{\text{н}}$. Оценить погрешность измерения $\Delta\chi$.

Указания к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и основные определения искомых величин.

2. Схему установки для контроля энергетических потерь излучения оптических покрытий.

3. Спектральную зависимость коэффициента отражения контролируемого зеркала.

4. Таблицу измеренных значений R_1^{min} , R_3^{min} , расчетных значений R_1^0 , R_3^0 , F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , $\frac{\partial A}{\partial \chi_{\text{в}}}$, $\frac{\partial A}{\partial \chi_{\text{н}}}$ вычисленных значений. $\chi_{\text{в}}$, $\chi_{\text{н}}$, A , $\bar{\chi}_{\text{в}}$, $\bar{\chi}_{\text{н}}$, $\Delta\chi$.

5. Выводы о проделанной работе.

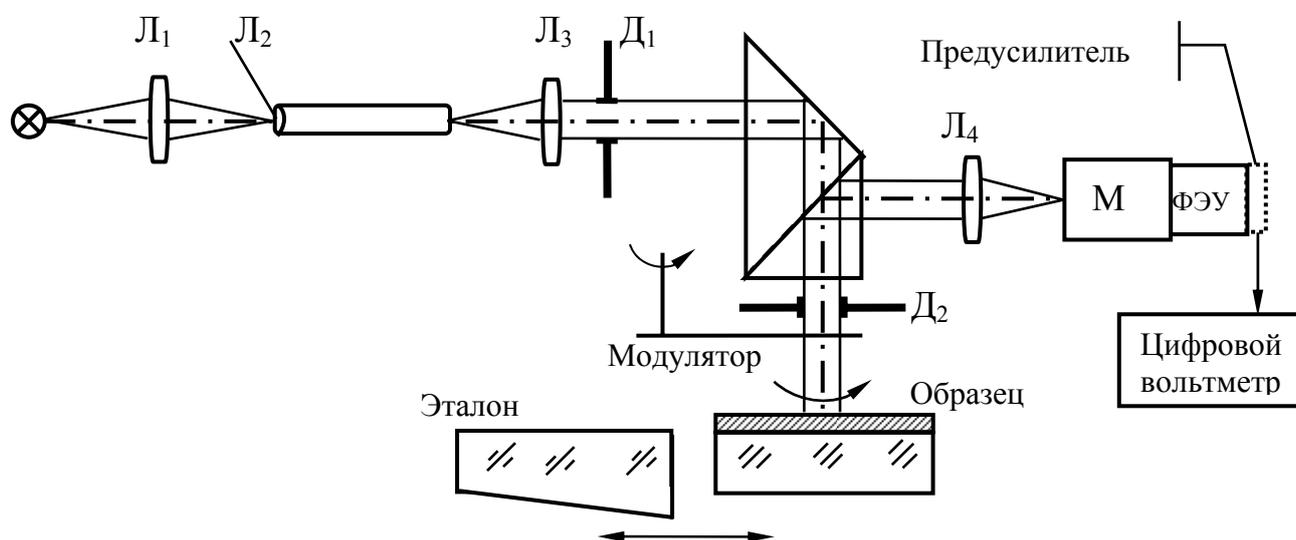


Рис. 10

Описание измерительной установки

В данной работе для реализации метода контроле энергетических потерь излучения на поглощение используется рефлексомер, схема которого представлены рис. 10.

Рефлексомер однолучевое спектрофотометрическое устройство на базе дифракционного монохроматора МДР-23 входящего в состав спектрофотометрического комплекса КСВУ—23. Отличительной особенностью установки является применение в качестве имитатора точечного источника света гибкого волоконного жгута, на переднем торце которого закреплена малогабаритная плосковыпуклая линза с фокусным расстоянием 0,7 мм.

Изображение спирали лампы проектируется при помощи линзы на торец световода. Линза L_2 служит для увеличения апертуры пучка на выходе световода. Вследствие многократных отражений внутри световедущих жил при наличии хаотических естественных изгибов световода, на его выходе формируется сильно расходящийся световой сучок со сферическим фронтом. Параллельный пучок после линзовой системы L_3 ограниченный диафрагмой D_1 попадает на исследуемую деталь и, отразившись от светоделительной грани кубика, фокусируется на входную щель монохроматора. Диафрагма D_2 выделяет узкий световой пучок диаметром 1,5-2 мм, отраженный от определенной зоны покрытия. Столик, на который помещен исследуемый образец, имеет возможность перемещения

перпендикулярно оптической оси, а также возможность поворота. Кроме того, столик имеет юстировочные приспособления, обеспечивающие возможность наклона в пределах $\pm 3^\circ$. В качестве преобразователя светового потока в пропорциональный электрический сигнал в установке использован фотоэлектронный умножитель с предусилителем на микросхеме. Индикатором служит цифровой вольтметр.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на величину энергетических потерь излучения в оптических покрытиях?
2. Сущность метода контроля поглощательной способности слоев, зеркала.
3. Чем определяется погрешность измерения R^{\min} ?
4. Чем вызвана необходимость контроля энергетических потерь излучения в слабопоглощающих диэлектрических покрытиях?

Список литературы

1. Комраков В.М., Шапочкин В.А. Измерение параметров оптических покрытий.— М. : Машиностроение, 1986.- 131с.
2. Большанин А.Ф., Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф. Измерение лучевой прочности диэлектрических зеркал резонаторов лазеров. Известия ВУЗов СССР. Приборостроение. - Т. XXIX. - №1.- С.71-79.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА КОНТАКТНЫХ СФЕРОМЕТРАХ

Цель работы: изучение способа и практическое освоение измерения радиусов кривизны сферических поверхностей на сферометрах ИЗС-7 и ИЗС-11.

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для проверки радиусов кривизны сферических поверхностей оптических деталей имеются различные способы и устройства. Большинство из них является контактными.

На стадии шлифования в качестве контрольных инструментов используют радиусные шаблоны, контрольные грибы и чашки, пробное стекло, сферометры. В оптическом производстве радиусные шаблоны изготавливают парами — шаблон и контршаблон (обычно из стали или латуни). Параметр шероховатости измерительных поверхностей не должен превышать $K_a=0,5$: твердость должна лежать в пределах 37-52 НКС_ф. Радиусы кривизны - по 8-му качеству точности (h8 для выпуклых и H8 для вогнутых). При совмещении шаблона и контршаблона их измерительные поверхности должны совпадать без заметного глазом просвета. На рис. 11 изображены шаблоны и контршаблоны для контроля радиусов (штриховой линией обозначено место маркировки). На нерабочие поверхности наносят защитные покрытия. Если при наложении шаблона на проверяемую поверхность наблюдается просвет A , то отступление ΔR радиуса кривизны проверяемой поверхности от радиуса кривизны шаблона определяется по формуле:

$$\Delta R = \frac{8AR^2}{l^2}, \quad (21)$$

где l - длина хорды, на которой наблюдается просвет (опытный наблюдатель может заметить наличие просвета $A=2...3$ мкм), отсюда

$$\Delta R = \frac{8(2...3)R^2}{l^2}, \text{ мкм.}$$

Проверка радиусов кривизны с помощью наложения (притирки) контрольных грибов и чашек, а также пробного стекла является качественной. Перед проверкой пробное стекло или проверяемая поверхность слегка увлажняется с помощью губки или выдыхаемого контролером воздуха. Затем проверяемая деталь слегка притирается к грибу, чашке или пробному стеклу. О наличии разности радиуса судят по размеру темного следа контакта (притертости).

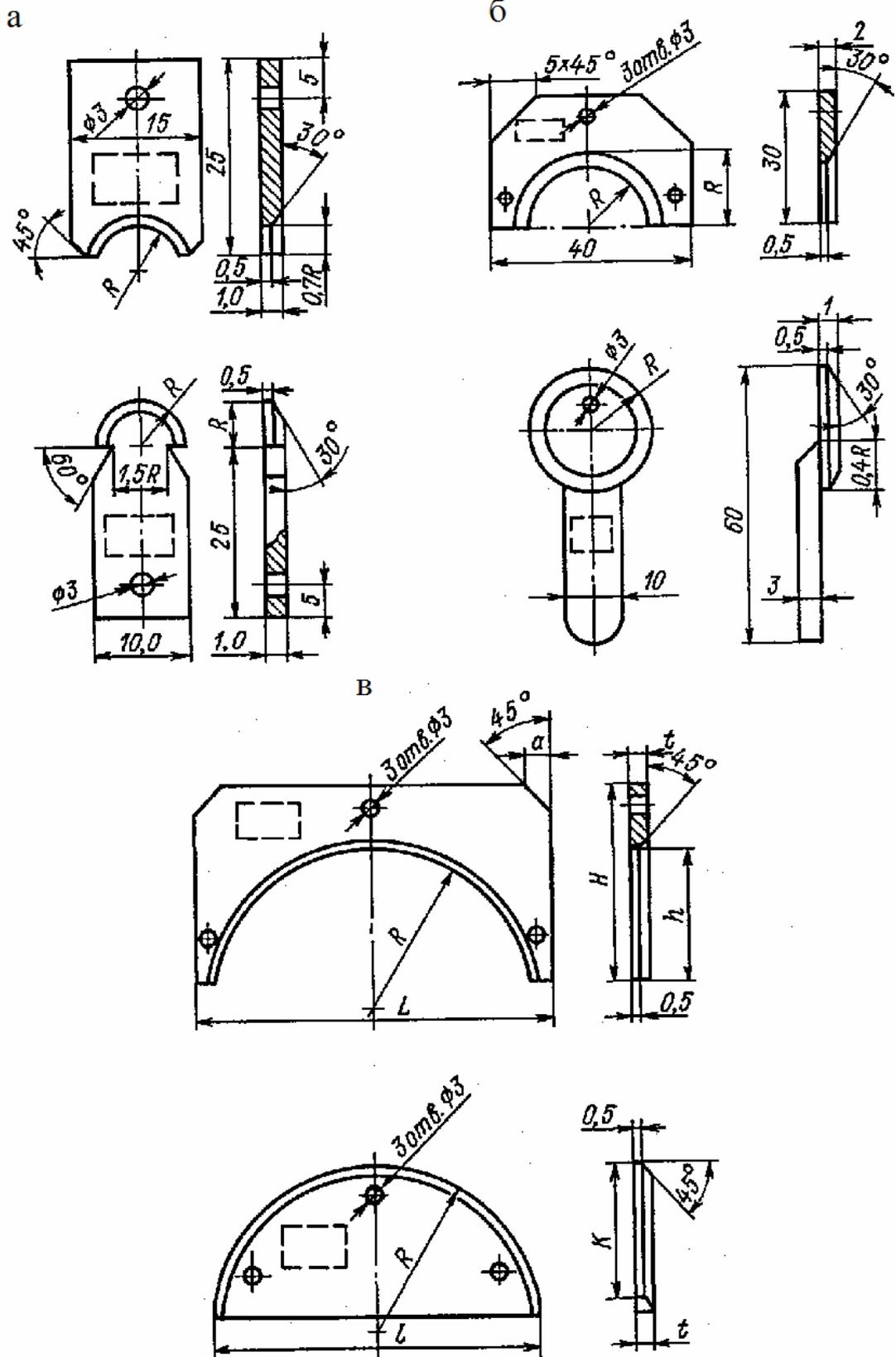


Рис. 11. Шаблоны и контршаблоны для радиусов: а – 0.5 до 5.0мм; б – от 5 до 20мм; в – свыше 20мм

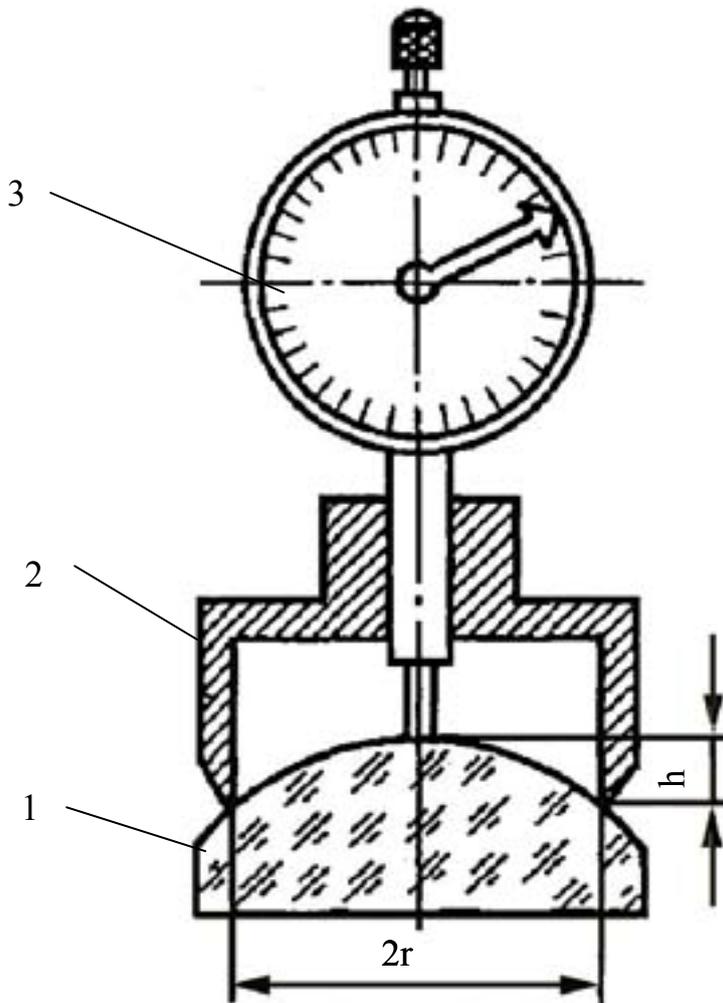


Рис. 12. Кольцевой контактный сферометр

Широкое применение в оптическом производстве получили кольцевые контактные сферометры. Принцип их действия состоит в следующем (рис. 12). На проверяемую деталь накладывается кольцо 2, диаметр рабочей кромки которого $2r$ известен с высокой точностью. Во втулке кольца помещен стержень измерительного прибора 3. С его помощью определяется высота h шарового сегмента, основанием которого служит плоскость рабочей кромки кольца. Радиус R проверяемой поверхности определяют по формуле:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}. \quad (22)$$

Имеется два типа сферометров. Один из них позволяет получать непосредственные значения h , с помощью другого определяется разность Δh между высотой сегмента, принятого за образец, и высотой и проверяемого сегмента. Промышленностью освоено производство двух

видов сферометров: настольные (ИЗС-7 и ИЗС11) и накладные (ИЗС-8 и ИЗС-9).

Настольные сферометры обычно используют в лабораториях и ОТК. С их помощью измеряют радиусы кривизны уже изготовленных пар пробных стекол и одиночных линз. Проверяемую деталь накладывают на прибор, который измеряет значение h . Накладные сферометры используют для измерения на рабочем месте. Их накладывают непосредственно на измеряемую деталь. Чтобы не повредить поверхность, операция измерения обычно выполняется на стадии шлифования. Технические характеристики контактных сферометров рассмотрены ниже.

На практике используют сферометры с различными конструкциями калиброванных колец: со сплошной ленточной ножевидной кромкой, с фаской, с шариковыми опорами. Измеряемый радиус R при использовании колец с шариковыми опорами вычисляют по формуле:

$$R = r^2 / 2h + h / 2 \pm \rho,$$

где ρ - радиус кривизны шаровой опоры; знаки «+» или «-» используются при вычислении радиусов кривизны соответственно вогнутой и выпуклой поверхностей.

Измерения на ИЗС-11 проводят в полуавтоматическом режиме. Обработка измерительной информации и вычисление радиусов кривизны по измеренным стрелкам осуществляется в программе устройства управления и обработки информации.

В качестве рабочего инструмента для контроля радиусов кривизны полированных поверхностей средней и высокой точности используют пробные стекла. Типы пробных стекол, их форма, размеры и характеристики установлены ГОСТ 2786-82* «Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. Технические условия». В соответствии с этим имеется три типа пробных стекол: рабочие (РПС), контрольные (КПС) и основные (ОПС). РПС предназначены для проверки поверхностей линз, КПС - для проверки РПС, а ОПС - для контроля КПС.

Радиусы кривизны поверхностей изделий контролируются с помощью интерференционной картины, которая наблюдается при наложении пробного стекла на проверяемое изделие. Одновременно осуществляют и контроль поверхности на местные ошибки - местные отклонения поверхности от заданной формы. Проверка осуществляется следующим образом. Рабочие поверхности проверяемого изделия и пробного стекла перед выполнением контроля тщательно промывают от загрязнений и очищают от пыли. После этого пробное стекло 2 (рис. 13) накладывают на изделие 1 и в рассеянном отраженном свете наблюдается интерференционная картина, возникающая в промежутке между контактирующими поверхностями.

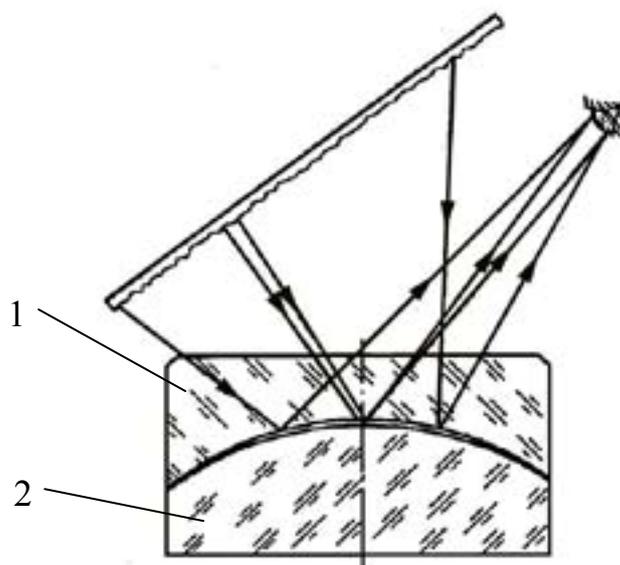


Рис. 13. Схема контроля радиусов пробными стеклами

Для получения правильных результатов необходимо, чтобы диаметр пробного стекла был не менее диаметра проверяемой детали, а центр полученной кольцевой интерференционной картины совпадал с вершиной проверяемой поверхности. Обычно операцию контроля радиуса кривизны поверхности совмещают с проверкой правильности ее формы. Согласно ГОСТ 2786-82*, стандартный максимальный диаметр пробных стекол не должен превышать 130мм. Однако по соглашению с заказчиком допускается изготавливать пробные стекла диаметром 150, 180 и 220 мм.

По точности изготовления радиусов кривизны и формы поверхности все пробные стекла делятся на три класса. Наиболее высоким является 1-й класс. Допуски на радиусы кривизны пробных стекол 1-го класса не превышают 0,02 %.

При контроле методом пробного стекла допуск на отклонение формы поверхности R задается числом интерференционных колец, наблюдаемых на всей проверяемой поверхности. Если диаметр проверяемой поверхности больше максимального диаметра пробного стекла (130мм), то допуск устанавливают исходя из диаметра пробного стекла.

Погрешность метода пробного стекла складывается из погрешности определения радиуса кривизны самого пробного стекла и погрешности оценки числа наблюдаемых интерференционных колец. Последняя погрешность обычно не превышает 0,5 кольца или 0,14 мкм. Вид интерференционной картины, получаемой при наложении пробного стекла на проверяемую поверхность, показан на рис. 14.

Для определения знака ошибки нажимают на пробное стекло, направляя усилие нажима вдоль оси изделия. При нажиме следят за движением интерференционных колец. Если кольца стягиваются к центру, то ошибка

имеет положительный знак, т. е. радиус кривизны выпуклой проверяемой поверхности больше радиуса пробного стекла (для вогнутой - наоборот).

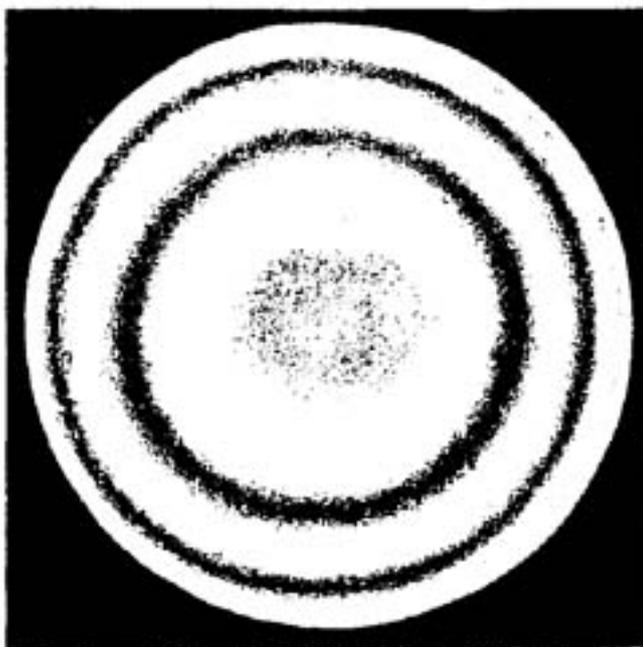


Рис. 14. Интерференционная картина при наложении пробного стекла

Если при нажатии кольца расширяются, уходя от центра, то ошибка имеет отрицательный знак, т.е. радиус кривизны выпуклой поверхности меньше радиуса кривизны вогнутой поверхности. Методы измерения радиусов кривизны самих пробных стекол устанавливаются ГОСТ 2786-82*. В табл. 5 приведены средства измерения радиусов кривизны пробных стекол 1-го класса точности, рекомендованные инструкцией. Указанные в таблице измерения на оптиметре ИКГ проводятся методом сравнения с концевыми мерами.

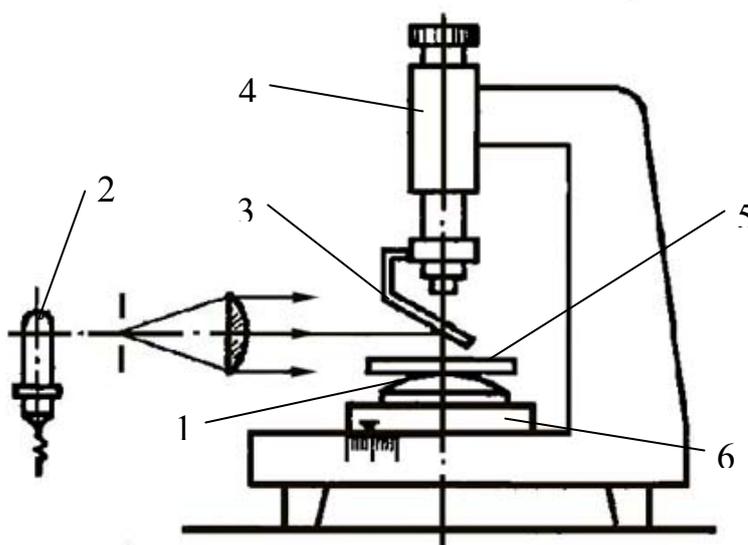


Рис. 15. Схема метода колец Ньютона

Для проверки радиусов кривизны поверхностей пробных стекол 2-го и 3-го классов точности инструкцией рекомендуется несколько методов. Среди них - метод непосредственного измерения с помощью микрометров (которые обычно применяют для измерения стекол - полушаров с небольшим радиусом кривизны), автоколлимационный метод и метод колец Ньютона.

По методу колец Ньютона измеряют радиусы кривизны, превышающие 2000мм (рис. 15). Проверяемая деталь 1 помещается на предметный стол 6 измерительного оптического прибора (модели ИЗА-2, УИМ-25, ВМИ), на нее накладывается плоскопараллельная стеклянная пластина 5, нижняя поверхность которой имеет минимальные отступления от идеальной поверхности ($N \leq 0.1M$). Монохроматическим источником света 2 с помощью полупрозрачной пластины 3 осуществляется подсветка промежутка между пластиной 5 и деталью 1.

Таблица 5

Средства измерения радиусов кривизны пробных стёкол

Радиус кривизны, мм	Средство измерения	Форма стекла	Предельная погрешность измерения
От 0.5 до 37.5	Горизонтальный оптиметр ИКГ	Выпуклое	от 0.175 до 4.0 мкм
От 37.5 до 4000	Автоколлимационная установка	Вогнутое	0.004 до 0.007%

Образовавшуюся в промежутке кольцевую интерференционную картину наблюдают в микроскоп 4, и радиусы колец измеряют перемещением стола прибора 6. Радиус кривизны вычисляют по формуле:

$$R = \frac{\rho_n^2 - \rho_p^2}{(k_n - k_p)\lambda},$$

где ρ_n радиус интерференционного кольца k_n , ρ_p - радиус кольца k_p , λ - длина волны используемого источника света; n и p - порядковые номера колец.

Расчеты показывают, что если $k_n - k_p = 200$, и наведение на кольцо осуществляется с точностью до 0,1 его ширины, то относительная погрешность измерения R не превышает 0,1 %. Эта погрешность может быть в два-три раза снижена, если проверяемую и плоскую поверхности пластины 5 покрыть светоделительным слоем и вместо двухлучевой получить многолучевую интерференционную картину.

Принципиальная схема прибора, используемого при автоколлимационном методе измерений радиусов кривизны вогнутых и выпуклых, показана на рис. 16.1 и на рис. 16.2 соответственно.

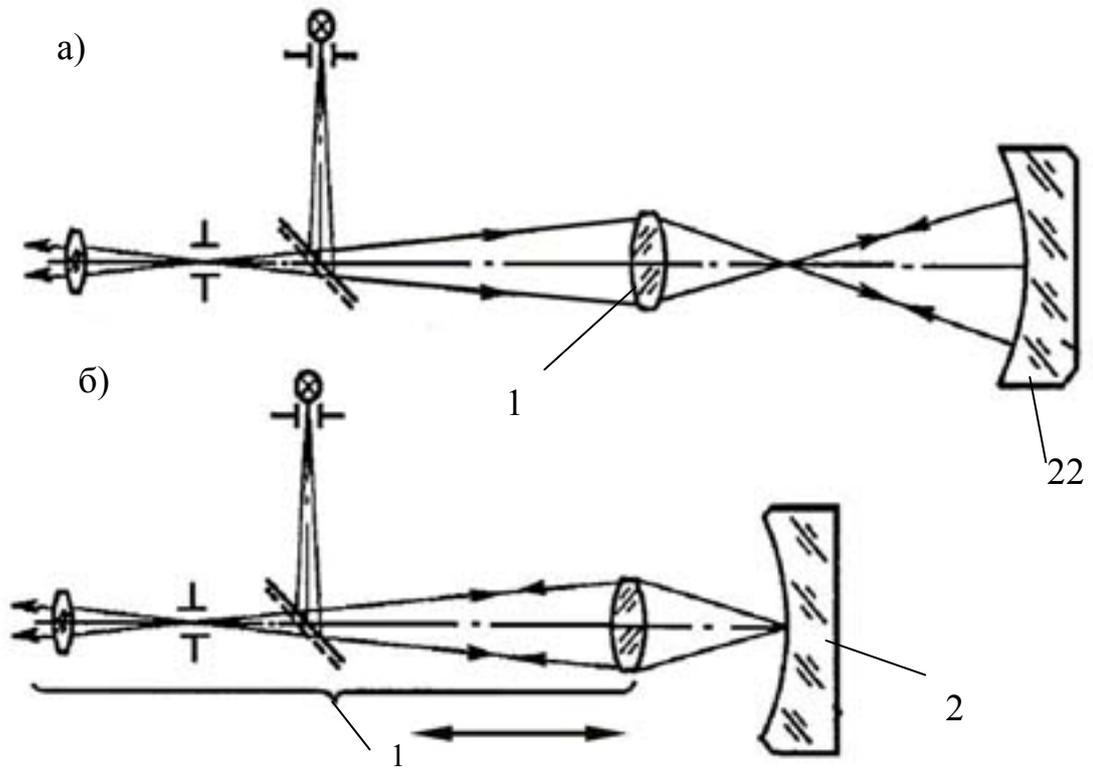


Рис. 16.1. Схема автоколлимационного метода измерения вогнутого радиуса кривизны

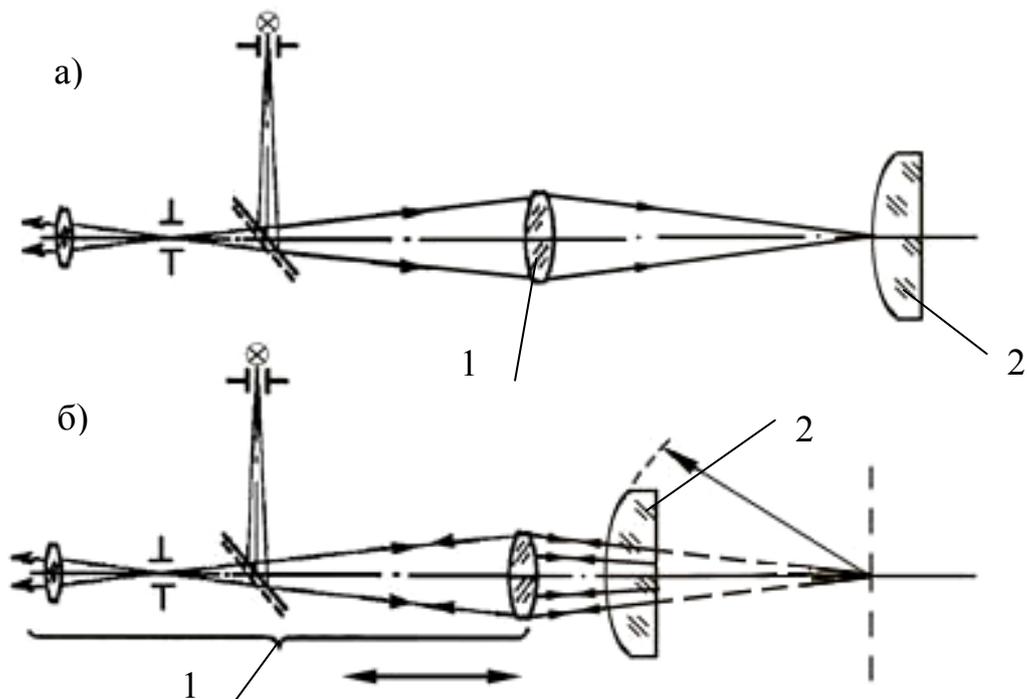


Рис. 16.2. Схема автоколлимационного метода измерения выпуклого радиуса кривизны

Основу ее составляет автоколлимационный микроскоп 1, имеющий измерительное перемещение вдоль своей оси и оси сферической поверхности проверяемой детали 2.

Для измерения радиуса кривизны вогнутой поверхности осевым перемещением микроскопа последовательно добиваются получения резкого автоколлимационного изображения сетки микроскопа при наведении его на центр кривизны (рис. 16.1 а), а затем на вершину поверхности измеряемой сферы (рис. 16.1 б). Разность отсчетов для этих крайних положений микроскопов равна измеряемому радиусу кривизны поверхности.

Для измерения радиуса кривизны выпуклой поверхности микроскоп последовательно наводят на вершину поверхности, а затем наводят на центр кривизны поверхности. Когда микроскоп наведен на центр кривизны измеряемой поверхности (рис. 16.2 б), лучи, выходящие из объектива, попадают на поверхность и отражаются от нее по тому же пути.

Точность измерений автоколлимационным методом в основном зависит от точности Δz фокусирования микроскопа центр кривизны. Она составляет с учетом действия автоколлимации, мкм, $\Delta z = 0,1/A^2$ где A - действующая апертура микрообъектива микроскопа или апертура измеряемой поверхности (берется наименьшее значение A).

Для уменьшения погрешности наведения (особенно при измерении радиусов кривизны поверхностей с малыми относительными отверстиями) в некоторых приборах применяют коинцидентный метод фокусировки. Диапазон радиусов кривизны поверхностей, измеряемых автоколлимационным методом, зависит от длины шкал измерительных приборов. При использовании измерительных машин типа ИЗМ удается измерять вогнутые поверхности с радиусом кривизны до 5000 - 6000 мм. При благоприятных обстоятельствах погрешность измерения не превышает 0,004%.

Для измерения радиусов кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей бесконтактным способом разработан прибор ГИП-2. В основу его схемы положен набор синтезированных голограмм. Принцип действия состоит в следующем (рис. 17).

Вышедший из лазера 1 пучок с помощью отклоняющих зеркал 2 и 3 направляется последовательно в малогабаритный 4 и крупногабаритный 6 расширители. За расширителем 6 в параллельном пучке помещена пластина 7, на которой нанесены две голограммы - основная и вспомогательная. Та и другая голограммы выполнены в виде кольцевых концентрических полос. Часть излучения лазера отражается от поверхности голограммы, возвращается в обратном направлении и после отражения от светоделителя 5, зеркала 9 прохождения объектива 10 попадает в регистратор 11. Эта часть составляет опорный пучок. Другая часть падающего излучения сигнальный пучок - дифрагирует на основной голограмме, причём в работе

используются пучки «плюс первого» и «минус первого» порядка. Проверяемая деталь 8 располагается так, чтобы рабочий пучок направлялся по нормали к ее поверхности. После отражения от поверхности сигнальный пучок возвращается в обратном направлении, совмещается с опорным пучком и интерферирует с ним. В тот момент, когда лучи сигнального пучка, совпадают с нормальными поверхности, производится первый отсчет по шкале 12. Другой отсчет выполняется тогда, когда после перемещения проверяемой детали вдоль хода лучей пучок вспомогательной голограммы оказывается сфокусированным на вершину контролируемой поверхности. Момент точной фокусировки фиксируется, как и в предыдущем случае, по прямым полосам интерференционной картины.

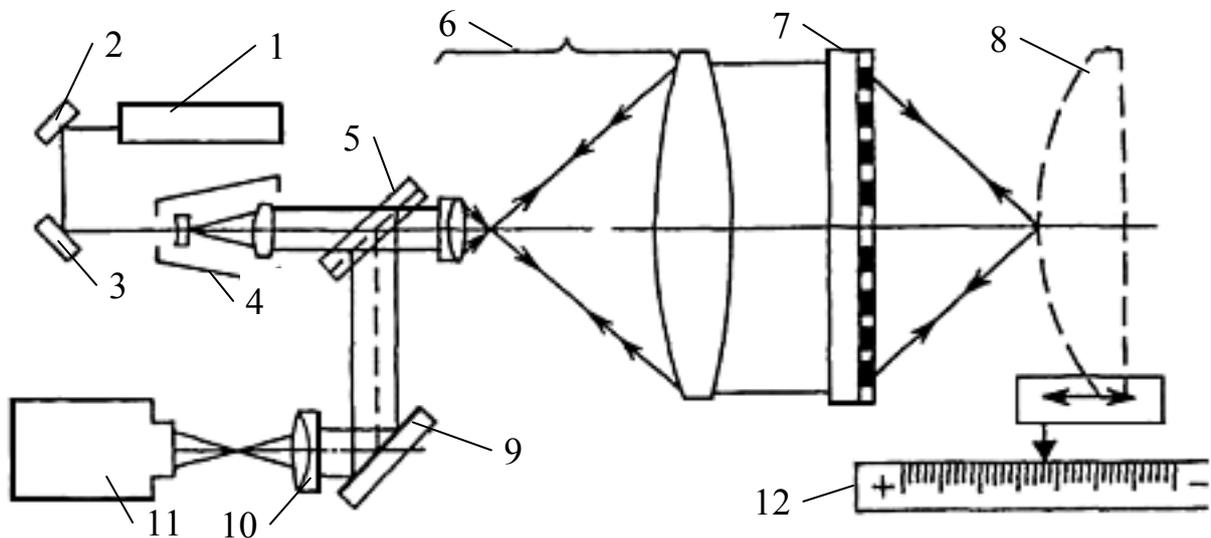


Рис. 17. Схема голографического метода измерения радиуса кривизны

Измеряемый радиус кривизны складывается из двух величин: фокусного расстояния вспомогательной голограммы и длины отрезка, на который пришлось переместить проверяемую деталь, что бы пучок вспомогательной голограммы оказался сфокусированным на вершину поверхности. Эта длина отсчитывается по шкале 12. Прибор ГИП-2 позволяет измерять радиусы кривизны сферических и цилиндрических поверхностей в диапазоне от ± 250 мм до $\pm 100\,000$ мм.

Выбор средств и методов контроля качества сферических поверхностей зависит от размеров проверяемых деталей, требуемой точности, твердости материалов, знака кривизны и ряда других факторов.

Наиболее широко используемым для этой цели инструментом является сферическое пробное стекло, накладываемое на проверяемую поверхность. Оно, как и плоское пробное стекло, позволяет осуществлять проверку деталей непосредственно на рабочем месте, причем одновременно с контролем качества поверхности производится также проверка радиуса кривизны.

Метод проверки сферических поверхностей пробными стеклами аналогичен методу пробных стекол, применяемому при контроле плоских поверхностей. Здесь также полосы кольцевой формы используют для обнаружения и оценки астигматической ошибки, дугообразные или прямые для измерения отклонений в виде местных бугров, ям, завалов на краю и т.п.

Точность количественной оценки зависит от многих факторов.

Перечислим некоторые из них:

1. разность радиусов кривизны сравниваемых поверхностей (при разности, не превышающей двух колец, можно получить точность до 0,1 полосы);

2. размер относительного отверстия проверяемой поверхности - отношение светового диаметра к радиусу кривизны; при большом относительном отверстии не удастся сразу по всей поверхности наблюдать интерференционную картину из-за большого различия углов падения лучей при переходе от центра к краю поверхности; вследствие этого погрешность контроля может достигать 0,5 полосы и более;

3. отношение диаметров образцовой и проверяемой поверхностей (чем меньше это отношение, тем меньше точность).

Более высокую оценку точности (0,10—0,05 полосы) обеспечивают приборы для бесконтактного контроля сферических поверхностей. Их можно разделить на две группы:

1. для проверки поверхностей деталей с малым и средним значениями диаметров;

2. для проверки поверхностей крупногабаритных деталей.

Рассмотрим принцип действия приборов первой группы (рис. 18).

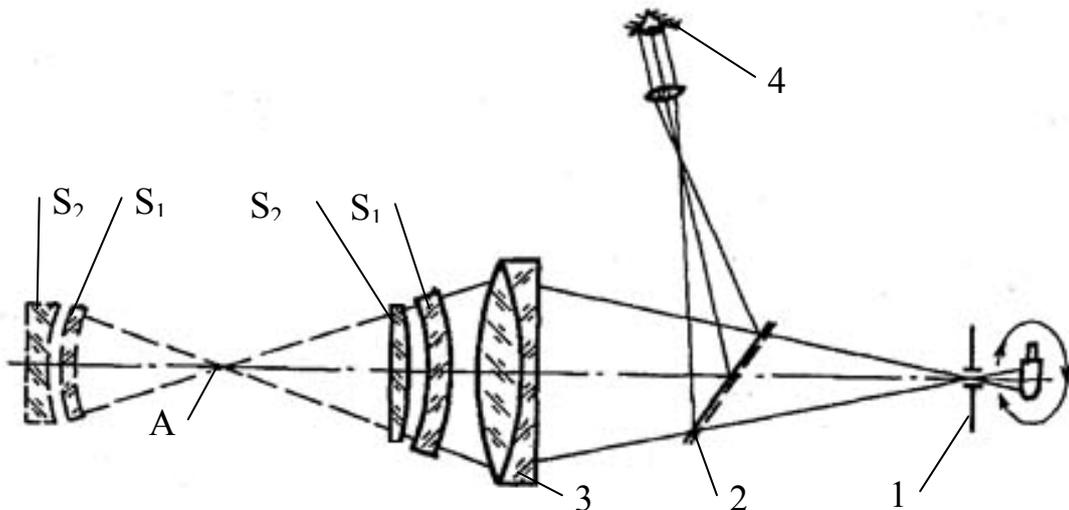


Рис. 18. Схема интерференционного контроля малогабаритных поверхностей

Монохроматический источник света освещает отверстие диафрагмы 1, которое высокоапертурным объективом 3 проецируется в точку А. С точкой А совмещены центры кривизны образцовой S_1 и проверяемой S_2 поверхностей. Положение S_1 и S_2 при контроле выпуклой поверхности показано сплошной, при контроле вогнутой штриховой линией. Отраженные от S_1 и S_2 пучки возвращаются в обратном направлении, интерферируют и светоделительной пластиной 2 направляются в глаз 4, наблюдающий интерференционную картину, локализованную в промежутке между поверхностями S_1 и S_2 . Деталь с образцовой поверхностью выполняется либо в виде концентрического мениска, либо в виде апланатической линзы. Перемещением проверяемой детали вдоль и перпендикулярно к оптической оси регулируют число и форму интерференционных полос. Кольцевые картины полос образуются при смещении центра кривизны проверяемой поверхности вдоль оптической оси, прямые полосы - при смещении перпендикулярно к оси.

Благодаря использованию монохроматического источника света и применению схемы, обеспечивающей падение лучей по направлению нормалей к поверхностям S_1 и S_2 можно с помощью одной образцовой поверхности контролировать большое число поверхностей с различными радиусами кривизны. Угол охвата проверяемого за один прием участка зависит от апертуры используемого объектива 3.

В приборах для контроля вогнутых поверхностей апертурный угол достигает 180° , для контроля выпуклых - до 140° . Максимальное значение радиусов проверяемых на этих приборах вогнутых поверхностей ограничивается только конструктивными соображениями, выпуклых — размером рабочего отрезка объектива 3. Опыт показывает, что при апертурном угле около 70° нецелесообразно создавать объективы с рабочим отрезком более 70 мм, так как диаметр объектива в этом случае становится чрезвычайно большим.

По представленной на рис. 18 схеме разработано несколько модификаций приборов (модели КЮ-210, КЮ-211 и др.). Основная область применения этих приборов - контроль изделий из мягких материалов, не допускающих использования контактных методов проверки, а также контроль точных поверхностей, имеющих большие относительные отверстия.

В последнее время разработаны интерферометры с расширенными возможностями. Они снабжены большим числом сменных узлов, применение которых позволяет контролировать плоские и сферические поверхности в большом диапазоне размеров, радиусов кривизны и относительных отверстий. Наибольшее распространение получили интерферометры фирмы «Zygo». В нашей стране аналогичный прибор модели ИКД-110 выпускает ЛОМО.

Прибор построен по схеме Физо, которая обеспечивает высокую точность контроля при сравнительно невысокой точности входящих в нее оптических элементов. Принципиальная схема устройства показана на рис. 19. Ее можно разделить на две части: базовый комплект и дополнительные (сменные) элементы, В базовый комплект входят узлы 1-15. Они выполняют следующие функции:

1. формируют коллимированный лазерный пучок диаметром 100мм; осуществляется это с помощью узлов 1-5;

2. строят автоколлимационное изображение зрачка 2' в плоскости фотоприемника 12; изображение формируется с помощью элементов 6-9, 11;

3. формируют с помощью элементов 4, 5, 11 - 15 изображение интерференционной картины в плоскости того же фотоприемника.

С помощью большинства сменных узлов реализуются интерференционные схемы, краткое описание которых приведено ниже. Два сменных узла служат для увеличения диаметра коллимированного пучка со 100 до 200 и 300 мм. Эти узлы представляют собой телескопические насадки с увеличением соответственно 2^x и 3^x помещаемые непосредственно после узла 5.

Сменные узлы, с помощью которых реализуются интерференционные схемы, в свою очередь, могут быть разбиты на две группы. К первой из них относятся узлы, используемые при контроле плоских поверхностей. Они представляют собой клиновидные стеклянные пластины, заключенные в оправу. Каждая пластина имеет высококачественную плоскость (поверхность сравнения). Отраженный от нее пучок используется в интерферометре в качестве опорного (на рис. 19 пластина 16 в схеме с пучком диаметром 100 мм). Рабочий пучок формируется и накладывается на опорный в результате отражения его от проверяемой поверхности 17.

При контроле сферических поверхностей непосредственно за узлом 5 помещается один из апланатических объективов 18, последняя сферическая поверхность которого по ходу лучей является поверхностью сравнения. Отраженный от нее пучок возвращается строго в обратном направлении и используется в качестве опорного пучка. Проверяемая поверхность 19 помещается так, что ее центр кривизны совпадает с центром кривизны сферы сравнения. Диаметры и радиусы кривизны поверхностей, которые могут быть проверены с помощью этой схемы, целиком зависят от таких параметров объектива, как его относительное отверстие и радиус кривизны сферы сравнения.

Контроль формы поверхностей основан на анализе формы и расположения интерференционных полос, локализованных на проверяемой поверхности. Анализ интерференционных картин и определение на его основе параметров контролируемой поверхности или отраженного от нее

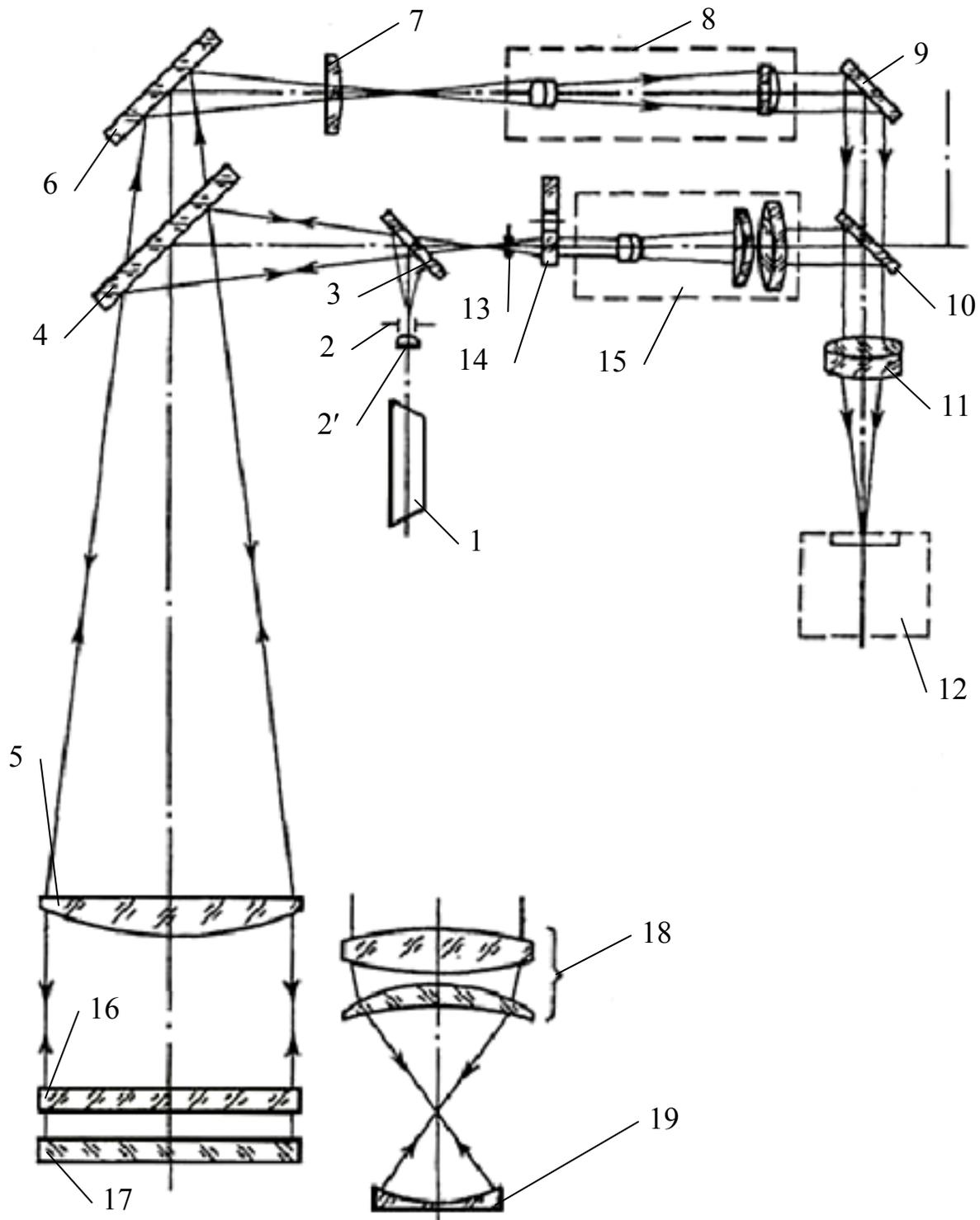


Рис. 19. Схема контроля на интерферометре модели ИКД

волнового фронта выполняется по специальной программе с помощью вычислительного комплекса в интерактивном режиме. В вычислительный комплекс входят телевизионная камера, видеоконтрольное устройство и

ЭВМ «Электроника МС-0125», снабженная дополнительным ОЗУ. Результаты обработки интерферограмм могут быть отражены на телевизионном экране, а также в виде распечатки. На экране могут быть отражены промежуточные результаты обработки интерферограмм (например, расстановка точек измерения координат интерференционных полос). Программой предусмотрены также возможность представления поверхности в аксонометрическом виде в различных ракурсах; попарная регистрация в память ЭВМ интерференционных картин с последующей автоматической выборкой одного кадра с наилучшим контрастом интерференционных полос. Минимальное время экспонирования интерференционной картины 1 мс.

Программное обеспечение интерферометра модели ИКД-1 10 позволяет получать следующие характеристики проверяемой поверхности или отраженного от нее волнового фронта: среднеквадратическую ошибку; размах ошибки, коэффициенты разложения волнового фронта или поверхности по полиномам Цернике, размах и направление астигматической ошибки и комы, размах зональной ошибки.

Опыт показывает, что заложенные в интерферометре ИКД-110 возможности в полном объеме могут быть использованы лишь частью производственных подразделений некоторых отраслей промышленности. К ним, в частности, относятся оптические лаборатории и ОТК предприятий оптической промышленности. На производственных участках, которые, как правило, специализируются на выпуске определенного вида продукции, целесообразно иметь сравнительно дешевый прибор ограниченных возможностей.

Таблица 6

Диапазон измерений радиусов кривизны

Относительное отверстие объектива	Радиус кривизны проверяемых вогнутых поверхностей, мм	Радиус кривизны проверяемых выпуклых поверхностей, мм
1:0.8	От -1000 до -3	3-45
1:1.5	От -2000 до -10	7-120
1:3.0	От -5000 до -35	25-270
1:5.0	От -10000 до -100	60-465
1:10.0	От -15000 до -200	220-950
1:20.0	От -20000 до -300	700-1950

несколько моделей базовых приборов и насадок к ним. В состав базовых приборов входит также вычислительный комплекс.

После букв ИН числа обозначают следующее: первое - размер светового диаметра поверхности сравнения клиновидной пластины, мм; второе - коэффициент отражения поверхности сравнения, %. При контроле

используют такую насадку, коэффициент отражения которой наиболее близок к коэффициенту отражения проверяемой поверхности.

Основной метрологической характеристикой прибора является погрешность при определении параметра EFE_q плоской поверхности: для диаметра 100 мм она составляет 0,02; 200 мм - 0,03 и 300 мм - 0,04.

Кроме модели ИКД-110 на оптических предприятиях применяют различные типы неравноплечих интерферометров. Наибольшее распространение получили модели ИТ-172, ИКД-100, ИКАП-3. Оптические схемы первых двух приборов мало отличаются друг от друга. Принципиальное их устройство показано на рис. 20.

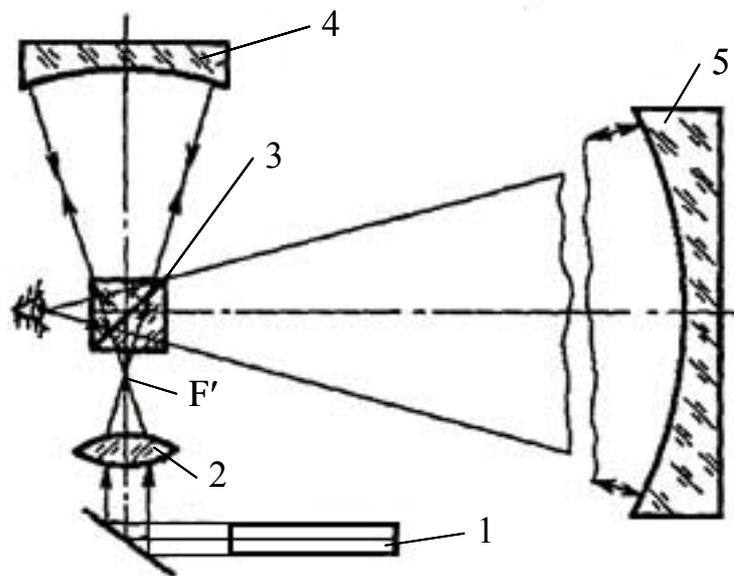


Рис. 20. Схема контроля на неравноплечем интерферометре

Микрообъектив 2 превращает параллельный пучок от газового лазера 1 в гомоцентрический с фокусом в точке F' . Вышедший из объектива 2 пучок кубиком 3 делится на два пучка, один из которых направляется в ветвь сравнения с образцовой сферой 4, другой в рабочую ветвь с проверяемой поверхностью 5. Центр кривизны обеих сфер совмещен с фокусом F' . Высокая монохроматичность лазерного излучения позволяет получать контрастную интерференционную картину при большой разности хода между интерферирующими пучками. Это дает возможность использовать в интерферометре образцовую поверхность небольшого радиуса и сравнивать с ней поверхности практически любых радиусов кривизны.

Обычно интерферометры снабжают сменными образцовыми сферами с зеркальной, просветленной и без покрытия поверхностями. Так, с помощью одного прибора можно осуществлять контроль поверхностей с различными коэффициентами отражения, в том числе и просветленных.

Неравноплечие интерферометры, как правило, являются переносными приборами. В связи с этим их удобно использовать при контроле

крупногабаритных вогнутых сферических и асферических поверхностей, когда возникает необходимость пристраивать прибор к проверяемому изделию.

При контроле поверхностей больших радиусов кривизны очень трудно настраивать систему с проверяемой деталью на полосы желаемой формы и направления. Это связано с неустранимым влиянием вибраций на взаимное положение интерферометра и контролируемого изделия и поэтому применить здесь методику визуальной оценки качества поверхности невозможно. В таких случаях на практике прибегают к фотографированию интерференционной картины с последующей ее обработкой, в процессе которой исключаются искривления полос, вызванные расфокусировкой интерферометра. Результаты могут быть обработаны вручную или с помощью специальных координатометров и ЭВМ. Ручная обработка занимает много времени и не дает полной информации о качестве проверяемой поверхности во всех ее точках, тогда как в результате обработки на ЭВМ получают контурные карты поверхности и ее профили в любых выбранных сечениях.

В общих чертах методика подготовки данных для ввода в ЭВМ состоит в следующем.

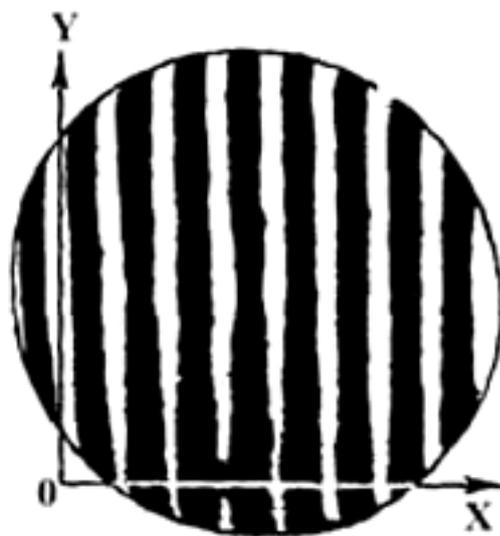


Рис. 21. Интерференционная картина в системе координат

Пусть ХОУ (рис. 21) является координатной системой, связанной с проверяемой поверхностью или ее изображением. Если поверхность является совершенной и наблюдаемая на ней интерференционная картина образована в клиновидном промежутке между двумя интерферирующими волновыми фронтами, то изменение толщины z этого промежутка может быть представлено уравнением:

$$z = a + bx + cy \quad (23)$$

При $z=N\lambda$ уравнение (23) является уравнением интерференционной полосы.

Если при получении интерференционной картины имелась дефокусировка поверхности, то полосы искривляются, и их уравнение может быть представлено в виде: $z=a+bx_i+cy_i+d(x_i^2+y_i^2)-N\lambda=0$, где i - номер полосы.

Если проверяемая поверхность имеет отклонения от идеальной формы, то для тех координатных точек, где имеются дефекты, уравнение будет отличаться от нуля на некоторую величину Δ_i , численное значение которой представляет собой отклонение поверхности. Нахождение i сводится к следующему. На интерферограмме замеряется много точек, для каждой из которых задаются координаты x_i и y_i номер полосы N_i . Затем методом наименьших квадратов определяют значения коэффициентов a , b , c и d :

$$\begin{aligned} ak + b \sum x_i + c \sum y_i + d \sum (x_i^2 + y_i^2) &= \sum N_i \lambda; \\ a \sum x_i + b \sum x_i^2 + c \sum x_i y_i + d \sum (x_i^2 + y_i^2) x_i &= \sum x_i N_i \lambda; \\ a \sum y_i + b \sum x_i y_i + c \sum y_i^2 + d \sum y_i (x_i^2 + y_i^2) &= \sum y_i N_i \lambda; \\ a \sum (x_i^2 + y_i^2) + b \sum x_i (x_i^2 + y_i^2) + c \sum y_i (x_i^2 + y_i^2) + \\ + d \sum (x_i^2 + y_i^2)^2 &= \sum (x_i^2 + y_i^2) N_i \lambda \end{aligned}$$

где k - полное число измеренных точек (суммирование выполняется в пределах от $i=1$ до $i=k$).

После нахождения коэффициентов вычисляют значения Δ_i для всех измеренных точек. По измеренным i математически (вручную или на ЭВМ) может быть построена карта отклонения проверяемой поверхности от идеальной формы. Если по роду работы требуется знать отклонение Δ_i в любой точке поверхности, то строят математическую модель деформированного волнового фронта методом круговых полиномов Цернике или с помощью преобразования Фурье.

Кроме неравноплечих интерферометров на некоторых предприятиях оптико-механической промышленности применяют интерферометры с рассеивающей пластиной. Принцип действия такого интерферометра поясняется на рис. 22.

С помощью конденсора 2 и светоделительной пластины 1 освещенное отверстие диафрагмы 3 проецируется в центр проверяемой поверхности 5. Для простоты на схеме показан только один луч, выходящий из центра диафрагмы. На своем пути к проверяемой детали луч встречается с рассеивающей пластиной 4, установленной перпендикулярно оси контролируемой поверхности и вблизи ее центра кривизны S .

рассеивающая пластина содержит большое число отверстий малого диаметра, расположенных попарно симметрично относительно оси.

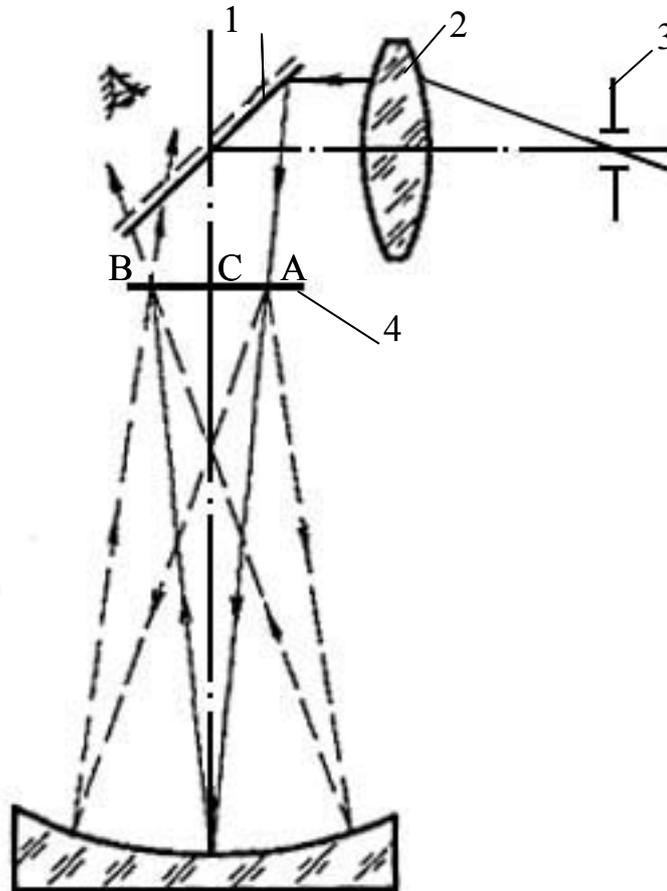


Рис. 22. Схема контроля на интерферометре крупногабаритных деталей с рассеивающей пластиной

Проходя в точке А через отверстие, луч дает начало первичному дифракционному пучку, который на рисунке обозначен штриховыми линиями. Первичный дифракционный пучок образует рабочую световую волну идеальной сферической формы.

После отражения от поверхности рабочая волна и прямой луч попадают в точку В, симметричную точке А. Здесь прямой луч дает начало второму дифракционному пучку, образующему идеальную сферическую волну сравнения. Она накладывается на рабочую волну, которая непосредственно проходит через рассеивающую пластинку. Возникающая при таком наложении интерференционная картина аналогична получаемой при использовании неравноплечего интерферометра.

По сравнению с неравноплечим интерферометром, интерферометр с рассеивающей пластиной обладает повышенной виброустойчивостью, не требует применения образцовой поверхности и высокомонохроматического

источника света. Он позволяет проверять поверхности с относительным отверстием до 1:3. Размер радиусов кривизны практически не ограничен.

Для контроля выпуклых поверхностей крупногабаритных деталей используют метод переналожения.

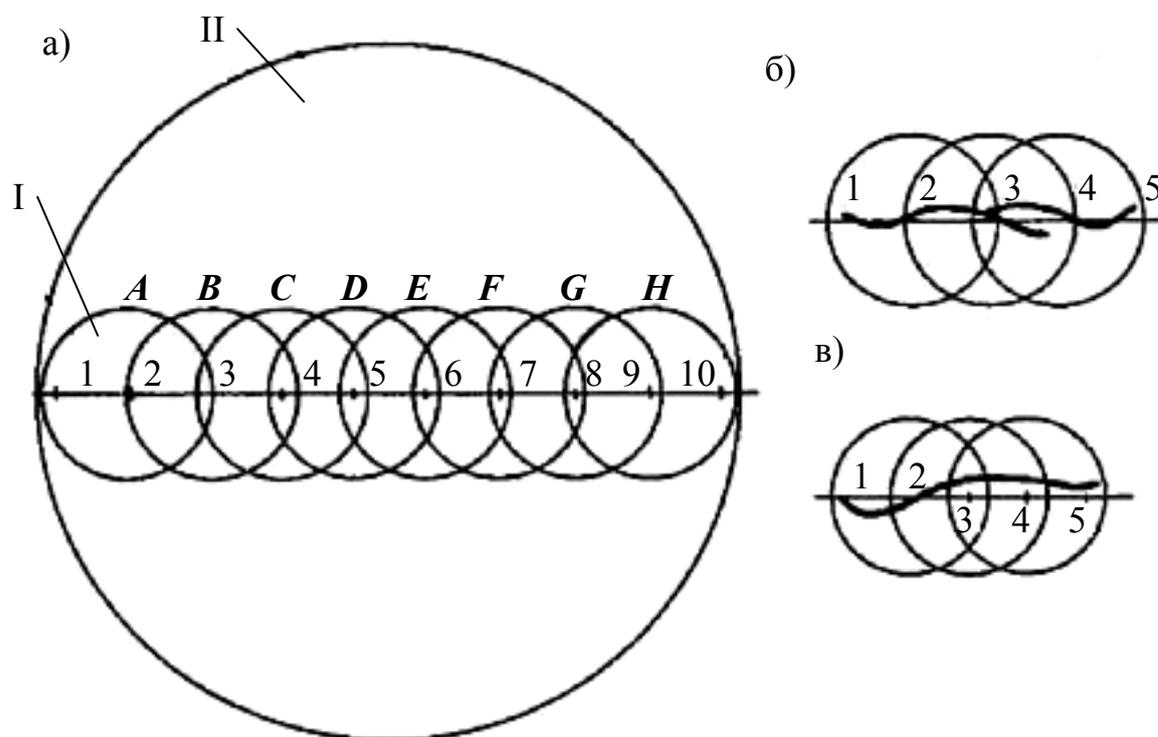


Рис. 23. Схема контроля по методу переналожения

Проверка методом переналожения выполняется с помощью пробного стекла I, диаметр которого существенно меньше диаметра контролируемой поверхности II (рис. 23, а). Перед проведением контроля проверяемую поверхность делят по ее диаметральному сечению на равные отрезки, длина которых составляет менее $1/3$ диаметра пробного стекла. Затем последовательно накладывают пробное стекло, как показано на рисунке, на позиции (стоянки) *A, B, C, D, E, F, G, H*. На каждой позиции наклоном пробного стекла добиваются получения такой картины, в которой полосы были бы направлены параллельно проверяемому сечению, и производят фотографирование полученных картин (вид картин на трех стоянках показан на рис 23, б). После измерения искривления полос производят их «увязку», в результате чего получают профиль всего проверяемого сечения. Методика «увязки» отдельных картин между собой показана на рис. 23, в.

Для облегчения контроля по частям разработан специальный интерферометр модели ЮС-1 70, обеспечивающий разгрузку проверяемой детали и пробного стекла и содержащий механизм регулирования ширины и направления полос, а также устройство для фотографирования картины. Осветительная система установки обеспечивает падение лучей

приблизительно по нормальям к проверяемой и образцовой поверхностям. Принципиальная оптическая схема такой установки аналогична показанной на рис. 22.

Суммарная ошибка ΔN оценки профиля всей поверхности пропорциональна числу стоянок и может быть вычислена с помощью равенства $\Delta N = \Delta n \sqrt{k}$, где Δn – ошибка оценки профиля по одной стороне.

Интерферометр ЮС-170 имеет следующие технические характеристики: максимальный диаметр проверяемых поверхностей 700мм; диапазон радиусов кривизны проверяемых поверхностей от 425мм до ∞ .

Для контроля правильности формы крупных астрономических зеркал как в производственных условиях, так и непосредственно в телескопах применяют метод Гартмана. При проверке в производственных условиях используют схему, показанную на рис. 24 схема метода Гартмана. Основу ее составляет диафрагма 2 с большим числом сквозных отверстий. От источника света 6 с помощью конденсора 5 и светоделительной пластины 3 лучи направляются к зеркалу 1 и попадают на его поверхность через отверстия диафрагмы 2. После отражения от зеркала пучки снова проходят через эти отверстия и попадают на фотопластинку 4, засвечивая ее светочувствительный слой. От измеренных на пластине размеров отклонений следов пучков Δz можно легко перейти к отклонениям на поверхности зеркала. Действительно, угловое отклонение осевого луча пучка, прошедшего через любое отверстие диафрагмы, равно $\varepsilon = \Delta z / L$.

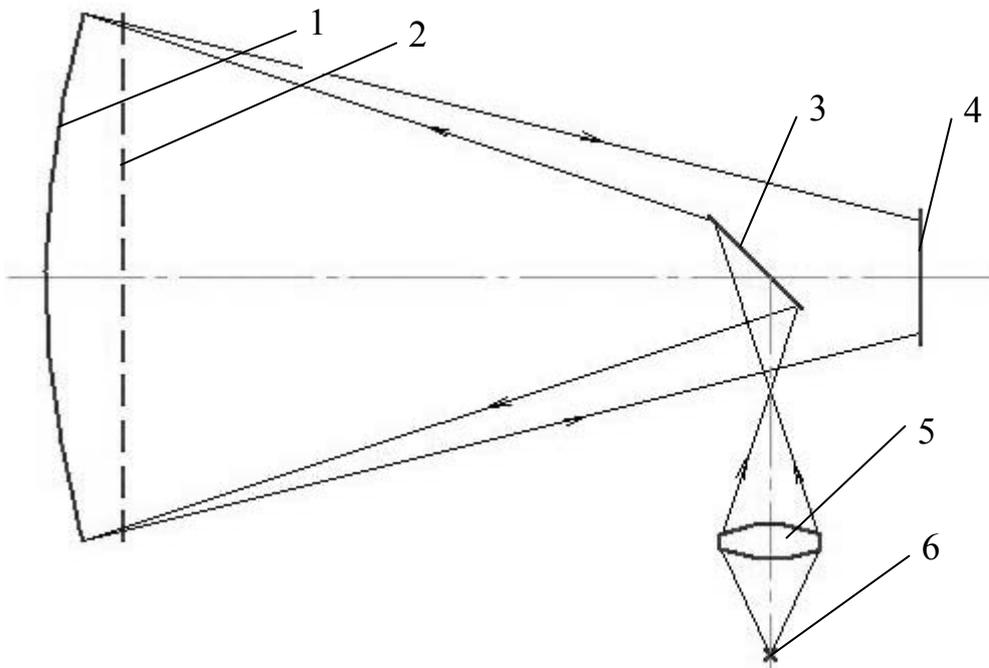


Рис.24 Схема метода Гартмана

Если расстояние между соседними отверстиями равно l , то отклонения Δh на поверхности зеркала можно вычислить по формуле:

$$\Delta h = \varepsilon l / 2 = \Delta z l / (2L).$$

Метод Гартмана требует выполнения большого объема измерений и вычислений, вызванных тем, что используемые на практике диафрагмы содержат несколько сотен отверстий. Для обработки результатов контроля методом Гартмана применяют ЭВМ, которая выдает численное значение отклонения поверхности в измеряемых точках.

В производственных условиях измерение радиусов кривизны сферических поверхностей осуществляют контактными и бесконтактными способами. Первые чаще всего выполняют на сферометрах, а также методом колец Ньютона; вторые - с помощью автоколлимационного микроскопа и автоколлимационной трубы. Выбор способа измерения зависит от величины радиуса контролируемой поверхности, требований к точности измерений и шероховатости поверхности (шлифованная или полированная поверхность). В частности, радиусы сферических поверхностей измеряют на кольцевом сферометре ИЗС-7 в диапазоне от 37,5 до 750 мм с пределом основной погрешности не более 0,04%, а на кольцевом сферометре ИЗС-11 - в диапазоне от 10 до 250 мм с пределом основной погрешности 0,03% и в диапазоне от 250 до 1000 мм с пределом основной погрешности 0,04%. В данной лабораторной работе измерения радиусов кривизны оптических поверхностей выполняют на сферометрах ИЗС-7 и ИЗС-11.

Сущность метода измерения радиусов кривизны поверхностей на механическом кольцевом сферометре

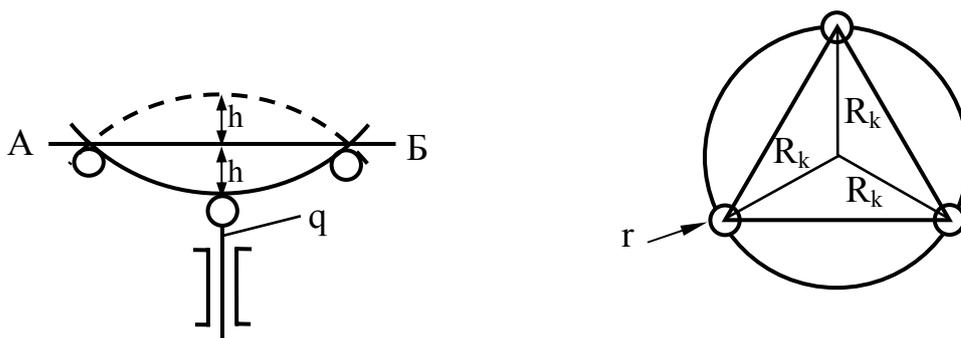


Рис. 25

Сущность метода (рис. 25) основана на измерении стрелки прогиба h сферической поверхности для известного диаметра кольцевой зоны и последующего вычисления радиуса R_c сферической поверхности.

Первоначально на кольцо радиуса R_k устанавливают эталонную плоскую поверхность «АБ». Измерительный стержень q приводят в соприкосновение

с эталонной поверхностью и снимают первый отсчет положения измерительного стержня. После этого на кольцо устанавливают контролируемую деталь со сферической поверхностью, измерительный стержень приводят в соприкосновение с этой поверхностью и снимают второй отсчет положения стержня. Разность отсчетов дает значение стрелки прогиба h .

При измерении радиуса кривизны поверхностей пары пробных стекол плоская пластинка не нужна. Разность из двух отсчетов при наложении выпуклой и вогнутой поверхностей (в любой последовательности) есть удвоенная величина стрелки прогиба h для одной из поверхностей.

Из геометрических соотношений очевидных из приведенного рисунка:

$$R_c = \frac{R_k^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm r. \quad (24)$$

Радиус кривизны поверхностей пары пробных стекол (выпуклого и вогнутого):

$$R_c = \frac{R_k^2}{2h} + \frac{h}{2}. \quad (25)$$

В этих формулах: r – радиус шарика опорного кольца. Знак «ПЛЮС» в формуле (24) соответствует вогнутой поверхности, знак «МИНУС» выпуклой поверхности.

Устройство сферометров

Устройство сферометра ИЗС-7

Внутри корпуса 1 (рис. 26) расположен измерительный стержень 2 с миллиметровой шкалой 3. В верхней части корпуса имеется площадка, на которую помещают измерительные кольца 4 с укрепленными на них шариками.

Непосредственно на эти шарики последовательно устанавливают эталонную плоскую деталь, а затем измеряемую деталь 5 со сферической поверхностью. Измерительный стержень под действием груза стремится подняться вверх и тем самым обеспечивает контакт сферического наконечника с поверхностью измеряемой детали.

Для отсчета положений измерительного стержня используется жестко связанная с ним миллиметровая шкала 3. Положение шкалы относительно корпуса прибора регистрируется с помощью измерительного микроскопа 6 со спиральным окулярным микрометром 7, имеющим маховик.

Внешний вид сферометра показан на рис. 27, узлы которого обозначены теми же позициями.

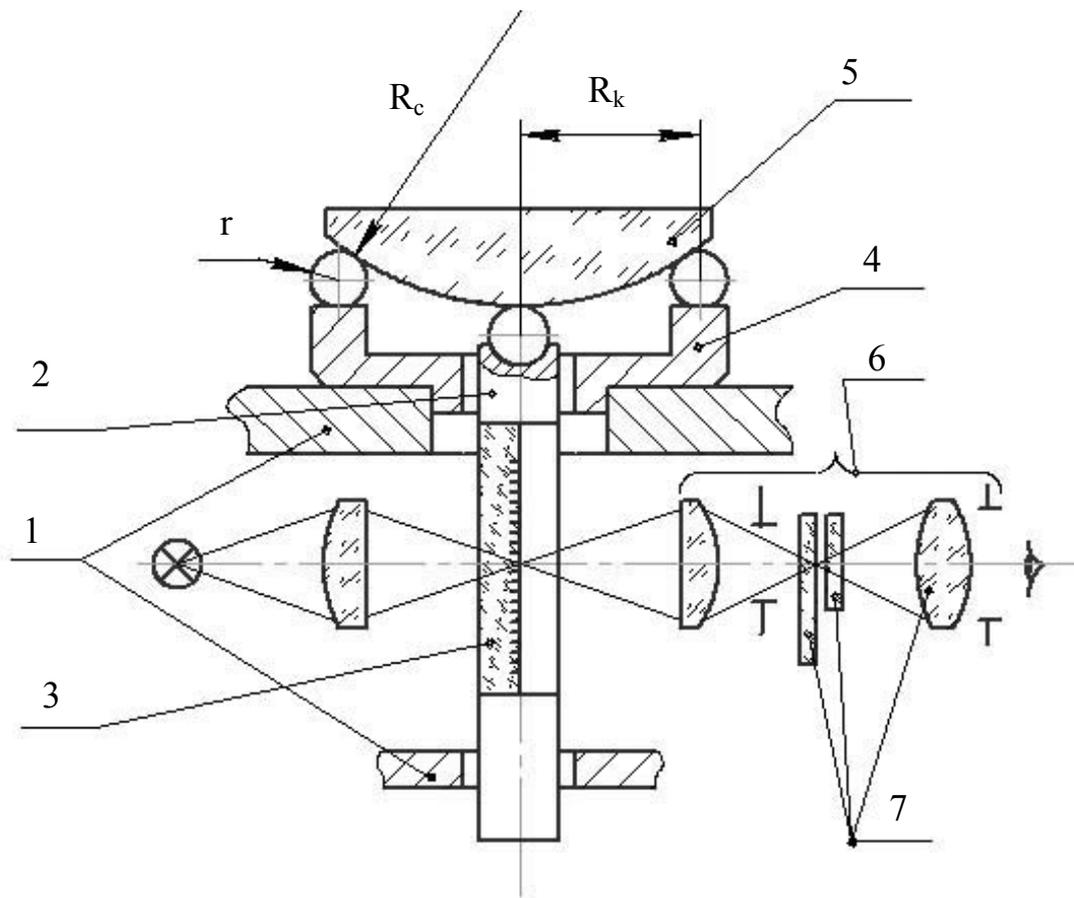


Рис. 26

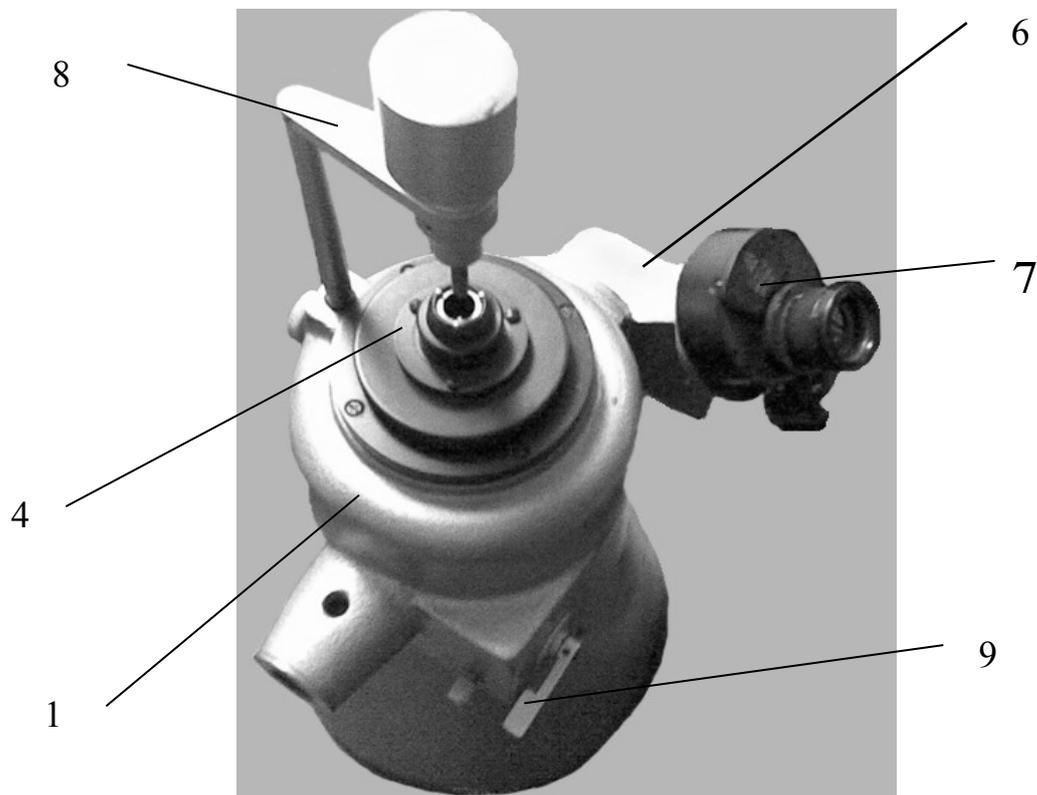


Рис. 27

Упор 8 используют, когда вес измеряемой детали меньше усилия, создаваемого измерительным стержнем. Упор дополнительно сверху прижимает деталь к измерительному кольцу. Для отвода измерительного стержня вниз служит рычаг-арретир 9.

В состав сферометра входит набор измерительных колец. Значения радиусов R_k окружностей, проходящих через центры шариков и радиусы r шариков приведены в аттестате прибора.

Прибор не требует предварительной подготовки к работе.

Устройство сферометра ИЗС-11

Сферометр ИЗС-11 состоит из двух основных блоков: первый представляет собой измерительное устройство, которое построено по схеме однокоординатного измерителя вертикальных перемещений, второй блок является устройством управления и обработки. Блок управляет перемещением измерительного наконечника с пинолью и выполняет обработку измерительной информации, включая вычисление радиусов по формулам (21), (22) и выдачу числовых значений контролируемых параметров на цифровое табло.

Внешний вид измерительного блока представлен на рис. 28.

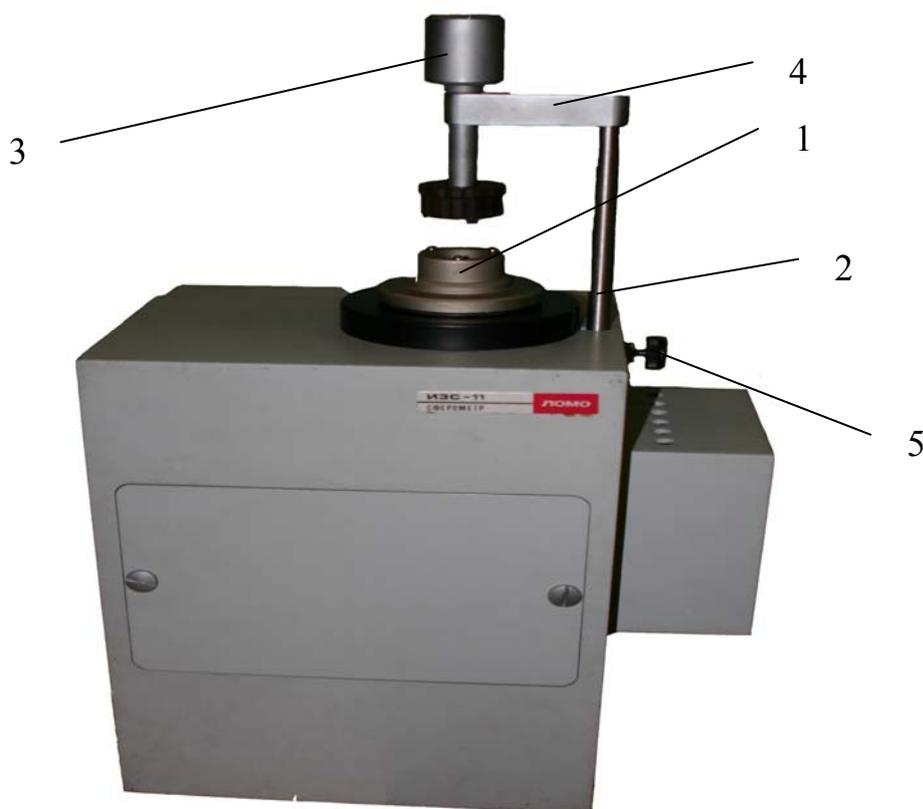


Рис. 28

Внутри корпуса размещен кронштейн с пинолью. Пиноль в кронштейне перемещается по шарикоподшипникам. В ней закреплена отражательная

дифракционная решетка. Подъем и опускание пиноли осуществляется с помощью электропривода, который состоит из электродвигателя, редуктора, винтовой пары и фрикциона. В верхней части пиноли закреплен измерительный наконечник. Опорные кольца 1 устанавливаются на подставку 2. Измеряемая деталь прижимается к шарикам опорного кольца при помощи груза 3. Груз имеет возможность вертикально перемещаться в ограничителе 4. В зависимости от размера установленного опорного кольца и контролируемой детали ограничитель закрепляют на требуемой высоте винтом 5.

Блок управления и обработки информации обеспечивает автоматическое выполнение нескольких операций, в частности:

- перемещение пиноли, ее торможение при контакте с измеряемой сферой с учетом предварительно заданных значений радиуса измеряемой сферы, номера опорного кольца и массы контролируемой детали;
- вычисление и развитие усилия прижима, необходимого для исключения погрешностей, вызванных контактными деформациями;
- вычисление радиуса кривизны сферы по полученному значению стрелки шарового сегмента и введение значения радиуса опорного кольца и радиуса шариков кольца;
- ввод на цифровое табло текущего значения координаты, вводимые с панели управления чисел и конечного результата измерения.

В состав устройства входят: плата управления приводом, нормирующий преобразователь и перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ), центральный процессор, преобразователь сигналов, устройство питания привода, блок питания, два сетевых фильтра и универсальный индикатор прибор ПИУ-2.



Рис. 29

Устройство управления (рис. 29) смонтировано в металлическом корпусе. На передней панели размещены индикаторное табло и кнопки управления режимами работы. На задней стенке корпуса размещен тумблер «ППЗУ». Назначение кнопок указано в нижеследующей таблице 7:

Таблица 7

Условное обозначение	Функциональное назначение
0,1 – 9	Ввода цифровых данных
,	Ввод запятой
X	Сброс индикации в ноль
№	Ввод номера опорного кольца
R	Ввод значения радиуса измеряемой сферы
M	Ввод массы измеряемой детали
Z	Вызов режима индикации текущей координаты
○	Вызов режима измерения пары пробных стекол
—	Вызов режима обнуления по плоскому эталону
☺	Вызов режима измерения выпуклой сферы
☾	Вызов режима измерения вогнутой сферы
Δ	Разрешение перемещения пиноли вверх
∇	Разрешение перемещения пиноли вниз
СТОП	Отмена перемещения пиноли
ВЫЧ.	Вызов режима вычисления результата измерения
СЕТЬ	Сетевой выключатель
СТОП	Аварийная остановка, блокирование привода

Подготовка прибора ИЗС-11 к работе

При подготовке прибора, в него вводят исходные данные, которые хранятся в перепрограммируемом постоянном запоминающем устройстве (ППЗУ) и остаются некоторое время в памяти при отключении сетевого питания.

Перечень исходных данных и символы кнопок используемых для введения этих данных в память ППЗУ, приведен в табл. 8.

Прибор укомплектован семью опорными кольцами номинальные радиусы R_k которых и радиусы r шариков приведены в табл. 9.

Таблица 8

Кнопка	Индикация	Параметр
N	$N = \dots$	Номер кольца
R	$R = \dots$ мм	Радиус кольца
Z	$r = \dots$ мм	Радиус шариков кольца
M	$M = \dots$ г	Масса детали
Δ	$= -0,0043$ мм	Поправка, необходимая для коррекции отсчетной системы
СТОП	$L = 30$ мм	Длина калибровочной меры
∇	$A = 1,585$ мм	Радиус наконечника пиноли
\ominus	$F = 0,1$ н	Поправка на жесткость пружины
X		Сброс параметра
-		Знак минус
ВЫЧ	ППЗУ	Занесение набранных исходных данных в ППЗУ

Таблица 9

Номер кольца	1	2	3	4	5	6	7
Радиус Кольца R_k , мм	7,4878	10,6362	14,9801	21,2356	29,9953	42,4861	59,9948
Радиус шарика r , мм	1,2368	1,2406	2,2871	3,1491	4,7563	4,7218	4,6211
Масса детали M , г	10	20	30	50	50	100	100

Исходные данные заносятся в ППЗУ со следующей последовательностью:

1. Нажать кнопку «сеть». На лицевой панели засветится светодиод, сигнализирующий о подаче питания; при этом в измерительном устройстве произошло контрольное включение двигателя, на табло появилась надпись «ИЗС-II», пиноль отошла в крайнее нижнее положение.

2. Включить тумблер «ППЗУ», расположенный на задней стенке блока управления. На табло должна появиться надпись «ППЗУ».

3. Для ввода параметра нажать кнопку с соответствующим обозначением и затем набрать числовое значение параметра в единицах измерения, которые высвечиваются в правой части табло.

4. Для занесения набранных параметров в память, нажать кнопку «ВЫЧ». При этом на табло появится надпись «ППЗУ» и все введенные параметры будут занесены в ячейки памяти.

5. Выключить тумблер «ППЗУ», на табло должна появиться надпись «ИЗС-II».

6. Для правильной работы сферометра в ППЗУ должны храниться значения параметров всех опорных колец, а для каждого кольца указаны значения параметров R_k , r и M .

Порядок выполнения работы

При выполнении работы производятся измерения радиусов кривизны указанных преподавателем деталей на сферометре ИЗС-7 и сферометре ИЗС-11.

Порядок измерения на сферометре ИЗС-7

Определение радиуса R сферической поверхности сводится к измерению на сферометре стрелки h шарового сегмента и вычислению радиуса по приведенным выше формулам. Измерение стрелки производят следующим образом:

1. На прибор устанавливают кольцо 3, диаметр которого на 5-20% меньше диаметра линзы. Предварительно шарики кольца и поверхности линзы промывают бензином и мягкой кисточкой смахивают с них пыль.

2. С помощью рычага-арретира 5 измерительный стержень «q» отводят вниз и на кольцо осторожно кладут эталон с плоской поверхностью. Рычаг отпускают, и стержень, плавно поднимаясь, приходит в соприкосновение с эталонной поверхностью.

3. Отсчет положения стержня производят по шкале с помощью микроскопа со спиральным окулярным микрометром. Для повышения точности измерения отсчеты повторяют не менее 5 раз и вычисляют среднее значение из полученных отсчетов.

4. Измерительный стержень «q» отводят вниз, эталонную деталь снимают и на кольцо устанавливают контролируемую деталь со сферической поверхностью. Рычаг отпускают, стержень поднимается и приходит в соприкосновение со сферической поверхностью.

5. Разность отсчетов при установке линзы и эталонной пластины составит стрелку прогиба h сферической поверхности. Подставляя измеренное значение h и известные для выбранного кольца величины r и ρ в приведенную формулу, вычисляют R .

При измерении радиуса R пары пробных стекол (выпуклого и вогнутого) плоскую пластинку не используют. Разность отсчетов при наложении на кольцо выпуклой и вогнутой поверхностей (в любой последовательности) представляет удвоенную величину стрелки прогиба – $2h$ измеряемой поверхности. Здесь, также как и при определении радиуса отдельной линзы, среднее значение R пары стекол рассчитывают по результатам многократных измерений (не менее 5 раз).

Порядок измерений на сферометре ИЗС-11

Измерения можно проводить после описанной выше предварительной подготовки прибора к работе, при которой в ППЗУ заносятся значения всех необходимых параметров.

Измерение радиуса R_c сферической поверхности отдельной детали

1. Процесс предварительной подготовки к работе с записью данных в ППЗУ заканчивается выключением тумблера «ППЗУ». После этого выполняется цикл автоматической проверки сферометра и отхода пиноли в

крайнее нижнее положение, а на табло появляется надпись «ИЗС-II».

Примечание:

Данные в ППЗУ при выключенном питании хранятся не менее суток. Если в ППЗУ сохранились данные, занесенные без ошибок при предыдущем включении прибора, то предварительной подготовки прибора не требуется. В этом случае к последующим операциям можно переходить, нажав кнопку «СЕТЬ» и дождавшись появления надписи «ИЗС-II».

2. На прибор установить кольцо, диаметр которого на 5-20% меньше диаметра подлежащей контролю линзы.

3. Нажать кнопку «N» и ввести в память номер установленного кольца.

4. Установить на опорное кольцо одно из плоских эталонных стекол. В частности, стекло №1 предназначено для колец №№ 5, 6 и 7, стекло № 2 – для колец №№ 3 и 4, стекло № 3 – для колец №№ 1 и 2.

5. Установить ограничитель с грузом в гнездо в корпусе, выдвинув его от риски на нижней части на 10-20 мм и закрепить винтом в верхнем положении. Отрегулировать высоту груза с помощью винта таким образом, чтобы при поднятии правой рукой самого груза, левой рукой можно было установить стекло. После чего, опустив груз левой рукой в нижнее положение, при необходимости подрегулировать положение всего ограничителя таким образом, чтобы груз лег нижней неметаллической частью на стекло, и между торцом пояска груза и его держателем образовался бы зазор примерно 5 мм. В этом случае груз действует на стекло. При работе со стеклом № 1, а так же с кольцами №№ 6 и 7 ограничитель не устанавливается.

6. Нажать кнопку «M» и ввести в память сферометра массу подлежащей контролю детали. Если масса детали неизвестна, то можно оставить данные введенные в ППЗУ при предварительной подготовке прибора к работе. В любом случае должно быть задано значение массы не превышающее фактическую массу детали.

7. Нажать кнопку «Z», затем кнопку «←». Нажатием кнопки «» установить цифру «1» в правой части табло.

8. Нажать кнопку «Δ». Когда пиноль, войдет в контакт с эталонной поверхностью и автоматически остановится, на табло появится значение текущей координаты, следует обнулить показания на табло нажатием кнопки «X».

9. Нажать кнопку «∇» Когда пиноль опустится вниз до упора, снять эталон и установить сферу.

10. Нажать кнопку «R» и ввести номинальный радиус (или его приближенное значение) измеряемой сферы.

11. Нажать кнопку «Z». Нажать кнопку «», если измеряется выпуклое стекло, или кнопку «», если измеряется вогнутая поверхность.

12. Нажать кнопку « Δ ». Пиноль поднимается до контакта с контролируемой поверхностью и при определенном усилии прижима останавливается. После остановки пиноли следует записать значение стрелки прогиба, появившееся на индикаторе. Далее следует нажать кнопку « ∇ » и после остановки пиноли в нижнем положении, кнопку «ВЫЧ». На табло появится значение радиуса сферы.

13. Для продолжения работы нажать кнопку «Z».

Измерение радиусов R_c сферических поверхностей пары пробных стекол (выпуклого и вогнутого)

На сферометр устанавливают опорное кольцо. На него накладывают одно из стекол пары (любое). Нажимают кнопку «N» и кнопками 0...9 вводят номер кольца. Нажимают кнопку «M» и вводят значение массы контролируемой детали. Нажимают кнопку «R» и вводят номинальное значение радиуса детали. Нажимают кнопку «Z»; нажатием кнопки « \ominus » устанавливают цифру «2» в правой части табло. Нажимают кнопку « \smile », если измеряется вогнутая поверхность, или кнопку « \frown », если измеряется выпуклая поверхность.

Нажимают кнопку « Δ ». Пиноль поднимается до контакта с контролируемой поверхностью и при определенном усилии прижима останавливается. Далее следует нажать кнопку «X» и обнулить показания. Нажатием кнопки « ∇ » отвести пиноль назад. Сменить деталь, нажать кнопку « \frown » или « \smile », ввести значение «M» массы детали. Нажать последовательно кнопки «Z» и « Δ ». После остановки пиноли в крайнем нижнем положении нажать кнопку «ВЫЧ». Снять с табло значение радиуса кривизны для данной пары стекол.

Для продолжения работы нажать кнопку «Z».

Примечание:

При измерении пар сферических поверхностей, номинальное значение радиуса кривизны которых неизвестно, следует сначала выполнить измерение для одного из стекол этой пары, установив его на наиболее подходящее опорное кольцо. Выполнить измерение руководствуясь правилами измерения одиночных сфер; введя в прибор в качестве номинального радиуса наименьшее возможное значение для данного опорного кольца (приблизительно равное 1–1,5 его радиуса) и определить R_1 .

Произвести измерение пары сферических поверхностей, введя в качестве номинального значение радиуса найденный радиус R_1 , и определить радиус R_2 . Для уточнения полученного результата повторить измерение пары сферических поверхностей, введя в качестве номинального значения радиус R_2 .

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений радиусов на механическом сферометре и основные расчетные формулы.
2. Таблицу результатов измерения радиусов двух линз на обоих сферометрах.
3. Вывод формулы для расчета погрешности измеренного радиуса в зависимости от погрешности измеряемой стрелки прогиба и погрешности радиуса кольца.
4. Расчет погрешностей результатов измерений, выполненных на обоих сферометрах.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров сферометра зависит его инструментальная погрешность?
2. Какую погрешность регистрации линейного перемещения измерительного штока обеспечивают сферометры?
3. Почему рекомендуется выбирать диаметр измерительного кольца близким к диаметру контролируемой детали?
4. Зачем в исходных данных программы работы сферометра ИЗС-11 требуется указывать массу детали?
5. Как устраняют погрешность, возникающую по мере износа шариков измерительных колец?
6. Назовите основные составляющие приборной погрешности механических сферометров.

Список литературы

1. Кулагин С.В., Гоменюк А.С, Дикарев В.Н. и др. Оптико-механические приборы: Учебник для техникумов/. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984.
2. Справочник технолога-оптика: Справочник. Бубис И.Я., Вейленбах В.А., Духопел И.И. и др. Под общ. Ред. Кузнецова С.М. и Окатова М.А. – Л.: Машиностроение. 1983. – 414 с.
3. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения: Учебник для вузов по специальностям «Оптико-электронные приборы» и «Технология оптического приборостроения». Под общ. Ред. Пуряева Д.Т. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Цель работы: контроль качества химической чистоты оптических поверхностей путем измерения угла смачивания.

Качество нанесения покрытий на оптические детали, в частности адгезия покрытия, зависит от качества очистки поверхности детали перед вакуумным напылением. Принято, что чистота подложек перед вакуумным напылением должна составлять 10^{-6} и менее граммов загрязнений на квадратный сантиметр поверхности. Подобные требования предъявляют и к поверхностям, подлежащим соединению глубоким оптическим контактом.

Классификация загрязнений и основные методы очистки

Все многообразие веществ, загрязняющих поверхность, можно разделить на две основные группы. К первой относят неорганические вещества, химически взаимодействующие с поверхностью основного материала и образующие с ним химические связи в виде оксидов, нитридов, сульфидов, продуктов выщелачивания стекла и кварца при взаимодействии с влажной атмосферой.

Загрязнениями второй группы являются, как правило, органические вещества в виде жиров, масел, следов полировальных и наклейных паст и смол, прикосновения рук и т.д. К этой же группе относят механические загрязнения (металлическую и минеральную пыль, волокна, ворсинки, частицы абразива и др.). Материалы второй группы взаимодействуют с основным материалом посредством адгезионных связей, не образуя с ним химических соединений.

Загрязнения первой группы удаляют травлением, при котором нарушаются химические связи загрязнений с основной поверхностью. Загрязнения второй группы удаляют обезжириванием, разрушая адгезионные связи.

На реальной загрязненной поверхности часто присутствуют загрязнения многих видов, поэтому очистка складывается из ряда последовательно выполняемых операций.

Очистку от жировых загрязнений минерального происхождения (полировальных и наклейных смол, различных смазочных материалов, минеральных масел и др.) производят в органических растворителях. Органические жировые загрязнения растительного и животного происхождения удаляют в водных растворах щелочей или солей щелочных металлов. При этом образуются растворимые в воде соединения (мыло). В щелочные водные растворы обычно вводят 1-3 г/л поверхностно-активного вещества. Для очистки детали погружают в горячий раствор. Детали удобнее погружать, если их предварительно установить в специальные

кассеты, выбираемые в зависимости от конфигурации и размеров деталей. При воздействии горячего раствора на жировую пленку понижается поверхностное натяжение пленки, и она рвется на мелкие капли, которые отрываются от поверхности и всплывают наверх. Одновременно отделяются и механические загрязнения. Удаленные загрязнения не всегда легко извлечь из раствора, поэтому обезжиривание проводят в нескольких (двух – четырех) ваннах со свежими растворами.

Органические жировые загрязнения удаляют в нескольких ваннах, заполненных соответствующим органическим или углеводородным растворителем: бензином Б-70, бензином «Калоша», уайт-спиритом, толуолом или бензолом. Иногда используют хлорированные углеводороды: трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, а также полифторуглерод – фреон 113.

Для интенсификации процессов обезжиривания и травления применяют комбинированные методы очистки, когда рабочему раствору сообщаются ультразвуковые колебания. Обезжиривание в ультразвуковом поле дает возможность удалить с поверхности не только жировые, но и механические загрязнения. Частота ультразвуковых колебаний в большинстве случаев находится в диапазоне 20...60кГц, а удельная акустическая мощность колебаний должна быть не менее 1...3 Вт/см².

Существенно уменьшить количество остаточных загрязнений можно при непрерывной безвозвратной смене растворителя, т. е. при обработке детали струей растворителя.

Высокое качество очистки (до 10^{-8} ... 10^{-9} г/см²) достигается при очистке в парах растворителя. В этом случае пары кипящего растворителя конденсируются на очищаемой поверхности и вместе с растворимыми и механическими загрязнениями падают в растворитель с каплями конденсата. При дальнейшем непрерывном испарении растворителя загрязнения, имеющие более высокую температуру испарения, в цикле “конденсация - испарение” не участвуют. В качестве рабочей жидкости при очистке в парах растворителя используют фреон-113 или и изопропиловый спирт, которые имеют невысокую температуру испарения и пары с достаточно высокой плотностью.

Наивысшая степень очистки, при которой остаются мономолекулярные слои загрязнений (10^{-10} .. 10^{-12} г/см²) достигается финишной очисткой в тлеющем разряде и протравливание катодным распылением. Процессы требуют специального оборудования и применяются в основном при научных исследованиях.

Возвращаясь к очистке деталей с помощью растворителей, следует отметить, что окончательную сушку деталей желательно производить в центрифуге или обдувом сухим азотом. При этом сводится к минимуму время взаимодействие растворителя с воздухом и уменьшается возможность создания новых пленок в результате такого взаимодействия. Если

очищаемая поверхность пористая, то полностью удалять влагу из капилляров поверхностного слоя лучше всего нагревом до температуры в несколько сот градусов.

Хранить хорошо очищенные детали надлежит в стеклянной таре, предохраненной от попадания пыли. Для хранения наиболее ответственных деталей тара должна быть очищена до степени чистоты хранящихся деталей. Лучше всего хранить очищенные детали в так называемом азотном шкафу – герметичном объеме, заполненном осушенным азотом. Нарушение герметичности приводит к тому, что при перепадах температуры окружающей среды тара начинает работать как насос. При повышении температуры воздух внутри тары расширяется и выходит наружу, а при понижении температуры воздух вместе с пылью окружающей среды проникает внутрь.

Методы контроля качества очистки поверхностей

Метод контроля выбирается в зависимости от того, какие дефекты очистки планируется обнаружить. Нет одного наилучшего метода, который позволяет выявить все дефекты очистки сразу.

Микрочастицы удобно выявлять, используя:

- микроскоп с косым освещением;
- микроскоп Номарского;
- микроскоп на принципе полного внутреннего отражения.

Пленки можно обнаружить, используя:

- микроскоп на принципе полного внутреннего отражения;
- эллипсометр;
- методы смачивания контролируемой поверхности дистиллированной водой.

Рассмотрим устройства для указанных вариантов проверки качества очистки поверхностей.

На рис. 30 представлена схема наблюдения поверхности в микроскоп при косом освещении.

При отсутствии загрязняющих частиц свет, падающий на контролируемую поверхность, зеркально отражается и не попадает в объектив микроскопа. На загрязняющих частицах зеркальное отражение нарушается, отраженный рассеянный свет попадает в объектив. В итоге частицы наблюдаются в микроскоп как светлые точки на темном фоне.

Интерференционный дифференциально-контрастный микроскоп Номарского часто применяется для наблюдения шероховатости и других дефектов поверхности. С его помощью можно наблюдать царапины, частицы пыли, следы очистки, отпечатки пальцев, микроскопические бугорки, микроструктуру, зернистость и следы механической обработки.

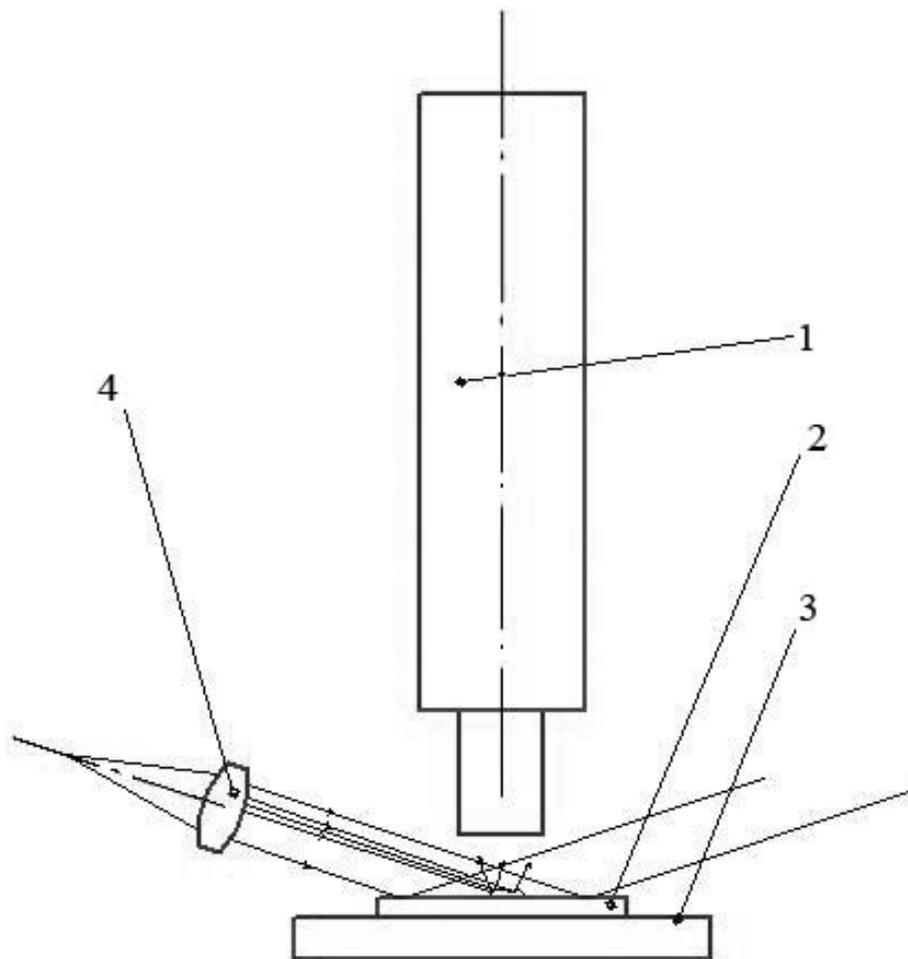


Рис. 30

Схема устройства представлена на рис. 31. Свет от осветителя проходит через поляризатор 1, отражается от светоделительного зеркала 2, проходит призму Волластона 3, где расщепляется на два взаимно перпендикулярных поляризованных пучка. Микрообъектив 4 на контролируемой поверхности 5 разделяет пучки в два пятна, сдвинутых относительно друг друга на малую величину (приблизительно 1 мкм). Небольшие дефекты будут создавать относительную разность фаз в отраженных пучках. Отраженные пучки, пройдя микрообъектив и призму Волластона, будут интерферировать в плоскости изображения. Каждый цвет или оттенок связан с определенной разностью фаз между пучками. Используя устройство для сдвига фаз совместно с поляризатором можно устранить цвет фона, оставив только ту часть пучка, видимость которой обусловлена дефектами поверхности. Таким образом, будут видны фрагменты, отличающиеся от остальной поверхности по высоте или оптическим константам.

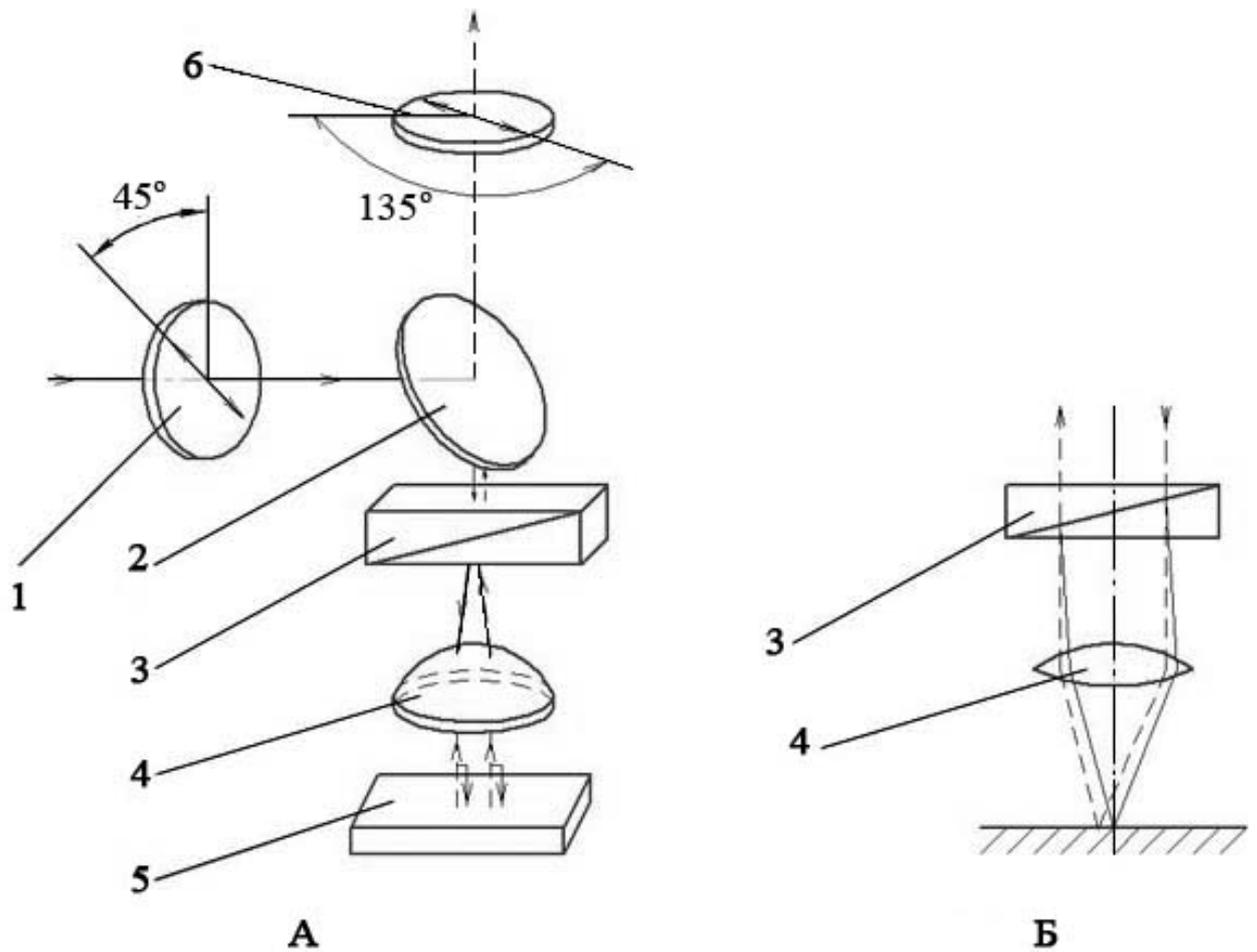


Рис. 31. Принципиальная схема микроскопа Номарского

Микроскоп на принципе полного внутреннего отражения можно использовать, когда позволяет конфигурация контролируемой детали. Схема устройства представлена на рис. 32.

Свет от лазера попадает внутрь образца через вспомогательную призму. Свет падает на контролируемую поверхность под углом большим или равным критическому углу и испытывает полное внутреннее отражение. Если на поверхности имеются частицы или другие дефекты, свет выходит наружу и может наблюдаться через микроскоп, сфокусированный на поверхность образца. В отдельных случаях такое устройство может применяться для обнаружения на поверхности загрязняющих пленок.

Эллипсометрия – очень чувствительный метод для исследования тонких пленок толщиной порядка мономолекулярного слоя, метод рассматривается в курсе оптических покрытий.

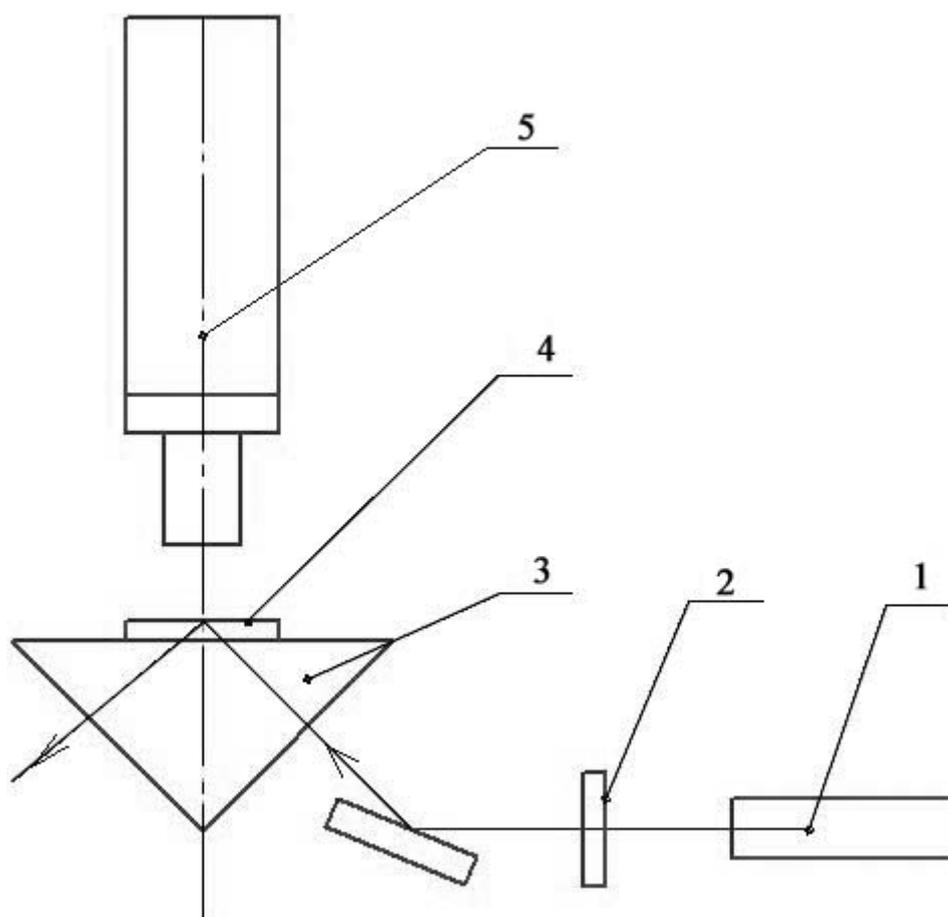


Рис. 32

Контроль загрязнений на основе нарушенного полного внутреннего отражения. 1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – вспомогательная призма, 4 – контролируемый образец, 5 – микроскоп.

Для оперативного контроля в производственных условиях наиболее пригодны методы проверки чистоты поверхности, основанные на свойстве пленки дистиллированной воды и другого поверхностного растворителя разрываться там, где имеются загрязнения поверхности. Эти методы имеют чувствительность $10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-8}$ г/см². К ним относятся: окунание подложек в воду (water break test), измерение угла смачивания поверхности водой и метод конденсации паров воды из воздуха на охлажденную ниже точки росы подложку. Данные по чувствительности методов приведены в таблице 10.

При использовании метода запотевания деталь держат над кипящей водой. Если на поверхности нет гидрофобных загрязнений, то образуется тонкая пленка конденсата, равномерно распределенная по всей поверхности. По методу конденсации деталь охлаждают над жидким азотом или твердой углекислотой. Извлеченная из дьюара деталь покрывается инеем, который начинает быстро таять. Скопление влаги в отдельные капли свидетельствует о наличии в этом месте загрязнения гидрофобными веществами. Контроль чистоты поверхности методом распыления заключается в пульверизации на

контролируемую поверхность чистой или подкрашенной воды. На чистой поверхности мельчайшие капельки воды смыкаются, образуя сплошную водяную пленку. На недостаточно чистой поверхности капельки остаются разрозненными. Чистая деионизованная вода, подкрашенная любым анилиновым красителем или фуксином, за счет лучшей контрастности капелек на поверхности детали значительно повышает чувствительность метода. Для того чтобы снизить кинетическую энергию водяных капелек, вылетающих из пульверизатора, опрыскиваемую поверхность следует располагать на расстоянии 50—60 см от сопла. В противном случае при ударе о поверхность капли сольются, что исказит результаты контроля. В качестве распылителя можно использовать обычный парикмахерский пульверизатор. Недостаток метода распыления состоит в том, что вода в сосуде пульверизатора может загрязниться гидрофобными органическими веществами, а, кроме того, размер и форму струи распыленной воды поддерживать трудно.

Таблица 10

Общедоступные методы контроля чистоты поверхности после очистки

Метод	Чувствительность при загрязнении, г/см ²	
	минеральных	органических
Запотевание	3×10^{-6}	2×10^{-7}
Конденсация	2×10^{-8}	4×10^{-9}
Распыление воды	3×10^{-7}	2×10^{-8}
Разрыв водяной пленки	6×10^{-6}	2×10^{-7}

Метод разрыва водяной пленки заключается в погружении контролируемой детали в сосуд с деионизованной или дистиллированной водой, которая должна переливаться через край сосуда (чтобы удалить возможные поверхностные загрязнения). Вынимать деталь из воды надо в вертикальном положении. На свободной от минеральных и органических загрязнений детали водяная пленка равномерно покрывает всю поверхность. По мере испарения и утончения водяной пленки она должна оставаться сплошной. На загрязненной поверхности пленка воды разорвется. При этом время между извлечением детали из сосуда с водой и моментом разрыва пленки характеризует степень загрязнения поверхности детали. Если количество органических загрязнений превышает 10^{-5} г/см², водяная пленка разрывается мгновенно, при $5 \cdot 10^{-5}$ г/см² - через 5-7 с, и при 10^{-6} г/см² - через 60 с. Для того чтобы было удобно фиксировать момент разрыва водяной пленки, ее наблюдают в отраженном свете, наклонив деталь на 45°.

Метод конденсации паров является наиболее трудоемким из-за охлаждения подложек, а метод окунания неудобно использовать при относительно малых размерах подложек.

В данной работе контроль качества очистки подложек выполняется путем измерения угла смачивания контролируемой поверхности деионизованной водой. На рис. 33 показана подложка с нанесенной на нее каплей воды. Мерой смачивания является краевой угол θ , образующийся между касательной к поверхности жидкости, проводимой от точки А; лежащей на периметре смачивания, и смоченной поверхностью твердого тела. Краевой угол всегда отсчитывается от касательной в сторону жидкости. Практически угол θ измеряют, формируя изображение капли жидкости в какой-либо плоскости и анализируя затем это изображение. Рис. 33 отражает случай так называемого контактного смачивания, в котором наряду с жидкостью и твердым телом участвует третья фаза - воздух (в других случаях это может быть газ или жидкость, не смешивающаяся с первой). Поверхностное натяжение жидкой и твердой фазы на границе с воздухом зададим коэффициентами поверхностного натяжения $\sigma_{ж}$ и $\sigma_{т}$. (коэффициент поверхностного натяжения определяется как сила, действующая на единицу длины контура, ограничивающего поверхность, перпендикулярно контуру и по касательной к поверхности).

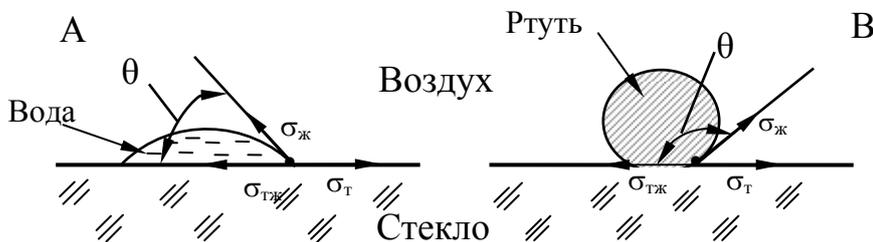


Рис. 33

Условия равновесия капли на твердой поверхности при контактном смачивании определяются соотношением σ на трех межфазных границах (на любую точку периметра капли, например С, действуют силы $\sigma_{ж}$, $\sigma_{тж}$ и $\sigma_{т}$) и описываются уравнением Юнга:

$$\sigma_{т} = \sigma_{тж} + \sigma_{ж} \cos \theta, \quad (26)$$

где $\sigma_{ж} \cos \theta$ - горизонтальная составляющая $\sigma_{ж}$, действующая вдоль поверхности твердого тела.

$$\text{Откуда } \cos \theta = \frac{(\sigma_{т} + \sigma_{тж})}{\sigma_{ж}}. \quad (27)$$

Это уравнение показывает, что $\cos \theta$, а значит и θ , зависит от природы трех контактирующих фаз. Если жидкость понижает поверхностное натяжение твердого тела, т. е. $\sigma_{т} > \sigma_{тж}$, наблюдается смачивание:

$$0 < \cos\theta < 1, \text{ краевой угол острый } 0 < \theta < 90^\circ, \quad (28)$$

при $\sigma_T < \sigma_{ТЖ}$ наблюдается несмачивание:

$$-1 < \cos\theta < 1, \text{ краевой угол тупой } 90 < \theta < 180^\circ. \quad (29)$$

Граничным углом между смачиванием и несмачиванием является $\theta=90^\circ$, полному смачиванию (растекание) отвечает $\theta=0$, а полному несмачиванию - $\theta \approx 160^\circ$ ($\theta < 180^\circ$ за счет силы тяжести).

Для контроля качества очистки поверхности перед вакуумным нанесением покрытия применительно к большинству марок бесцветного оптического стекла, включая кварцевое, для смачивания деионизованной водой можно пользоваться следующими данными таблицы 11.

- угол $\theta = 4^\circ \dots 8^\circ$ - отличное качество очистки поверхности;
- угол $\theta = 8^\circ \dots 12^\circ$ - хорошее качество очистки поверхности;
- угол $\theta = 12^\circ \dots 16^\circ$ - удовлетворительное качество очистки поверхности;
- угол $\theta \geq 16^\circ$ - неудовлетворительное качество очистки поверхности.

Таблица 11

Значение угла смачивания θ	Качество очистки
$4^\circ \dots 8^\circ$	отличное качество очистки
$8^\circ \dots 12^\circ$	хорошее качество очистки
$12^\circ \dots 16^\circ$	удовлетворительное качество очистки
$\geq 16^\circ$	неудовлетворительное качество очистки

Для последнего случая (угол $\theta \geq 16^\circ$) требуется повторная очистка с обязательным анализом причин неудовлетворительного качества первоначальной очистки.

Практическая реализация устройств, для измерения угла смачивания получается достаточно простой. Так, фирма TANTEC (USA), выпускает устройства, которые для измерения краевого угла смачивания с помощью оптической системы строят изображение капли с подложкой в плоскости анализа. В плоскости анализа помещается поворотный штрих, связанный с лимбом. Оператор при измерениях поворачивает штрих, пока он не займет положение касательной. При малых углах существенно возрастает субъективный фактор – положение штриха, как касательной оператор устанавливает «на глаз».

В данной работе для измерения угла смачивания используется устройство, построенное по схеме, представленной на рис. 34.

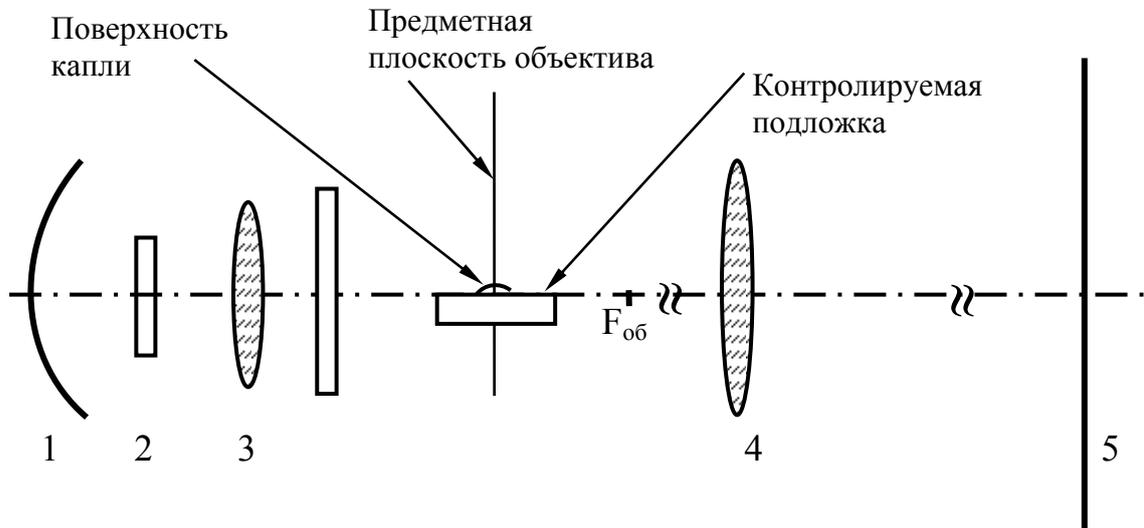


Рис. 34

В предметной плоскости располагается контролируемая поверхность, на которую с помощью дозатора (на рисунке не показан) нанесена капля деионизованной воды. В качестве осветителя используется лампа 2 с отражателем 1 и конденсором 3. Объектив 4 строит изображение предметной плоскости, где расположена подложка с каплей, на экране 5. Изображение получается аналогичным изображению, представленному на рис. 33. Угол смачивания вычисляется по характерным линейным размерам изображения рис. 35 в предположении, что поверхность капли имеет сферическую форму.

Проведение касательной к поверхности капли в крайней точке «на глаз» нежелательно, так как дает относительно большие погрешности измерения угла, особенно при малых его значениях.

Выделим на изображении капли точки A_1 A_2 A_3 , как показано на рис. 35, тогда получим диаметр капли $D = A_1A_3$ и высоту капли $h = A_2B$. Далее легко определить R - радиус кривизны поверхности капли

$$R = \frac{4h^2 + D^2}{8h} \quad (30)$$

$$\text{и угол смачивания } \vartheta = \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right). \quad (31)$$

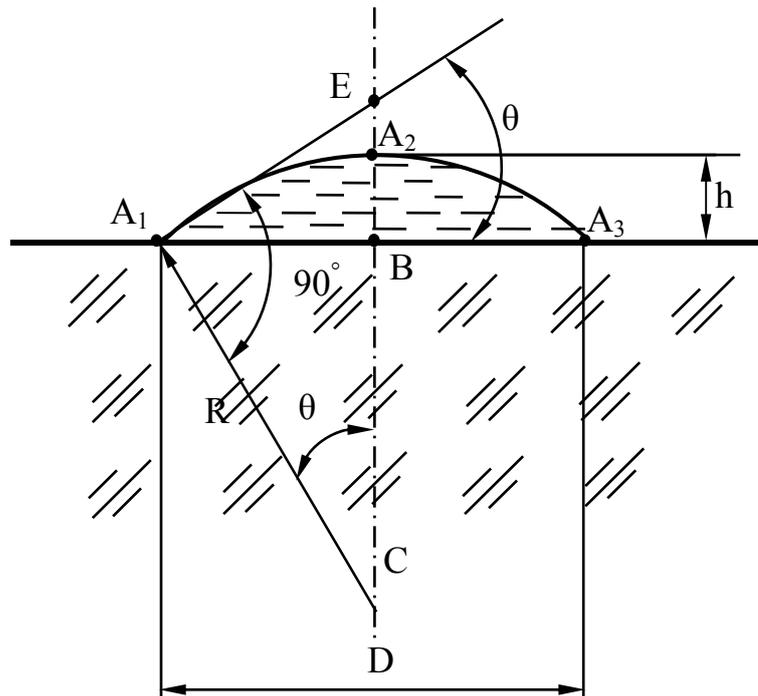


Рис. 35

Порядок выполнения работы

1. На контролируемую поверхность нанести каплю дистиллированной воды.
2. Поместить образец на предметный столик проекционной системы.
3. На экран поместить чистый лист бумаги (А4), на котором будет изображение капли в увеличенном виде.
4. На экране должна наблюдаться картина, подобная изображенной на рис. 35.
5. Перевести изображение капли на лист бумаги, отметив точки A_1 A_2 A_3 а так же высоту капли - h и ее диаметр - D .
6. По формулам (30), (31) вычислить радиус кривизны поверхности капли R и угол смачивания θ .
7. Оценить качество очистки поверхности.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы;
2. Краткую теоретическую часть;
3. Схему лабораторной установки;
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы контроля химической чистоты поверхности?

2. Основные источники инструментальных погрешностей установки для контроля чистоты поверхности по углу смачивания.

3. Какие предъявляются требования к химической чистоте оптических поверхностей, подготовленных к вакуумному нанесению покрытий и к склеиванию?

4. Какие методические погрешности возникают при контроле химической чистоты поверхности по углу смачивания?

Список литературы

1. Малахова А.Я. Физическая коллоидная химия - Мн.: Выш. Школа, 1981.
2. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. - Л., Химия, 1984.
3. Коленко Ч.А. Технология лабораторного эксперимента: Справочник-СПб: Политехника, 1994.
4. Калужнин Л.А. Введение в общую алгебру.- М. Наука, 1973.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ДВУХЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Цель работы: – измерение толщины тонких пленок и шероховатости поверхности оптических деталей с помощью микроинтерферометров МИИ-9 и МИИ – 4.

Параметры шероховатости поверхности определяются в соответствии с ГОСТ 2789-73. Этот стандарт распространяется на шероховатость поверхности изделий независимо от их материала и способа получения поверхности. Стандарт устанавливает перечень параметров и типов направлений неровностей, которые должны применяться при установлении требований и контроле шероховатости поверхности, числовые значения параметров и общие указания по установлению требований к шероховатости поверхности.

ГОСТ 2789 73 не распространяется на шероховатость ворсистых и других поверхностей, характеристики которых делают невозможным нормирование и контроль шероховатости имеющимися методами, а также на дефекты поверхности, являющимися следствием дефектов материала (раковины, поры, трещины) или случайных повреждений (царапины, вмятины, сколы и т. д.).

Параметры шероховатости:

1. R_A - среднее арифметическое отклонение профиля;
2. R_Z - высота неровностей профиля по десяти точкам;
3. R_{MAX} – наибольшая высота профиля
4. S_M – средний шаг неровностей;
5. S – средний шаг местных выступов профиля;
6. T_P – относительная опорная длина профиля, где P – значение уровня сечения профиля.

Графическое представление параметров шероховатости выполнено на рис. 36.

Обозначение и определение параметров шероховатости поверхности приведены в таблице 12.

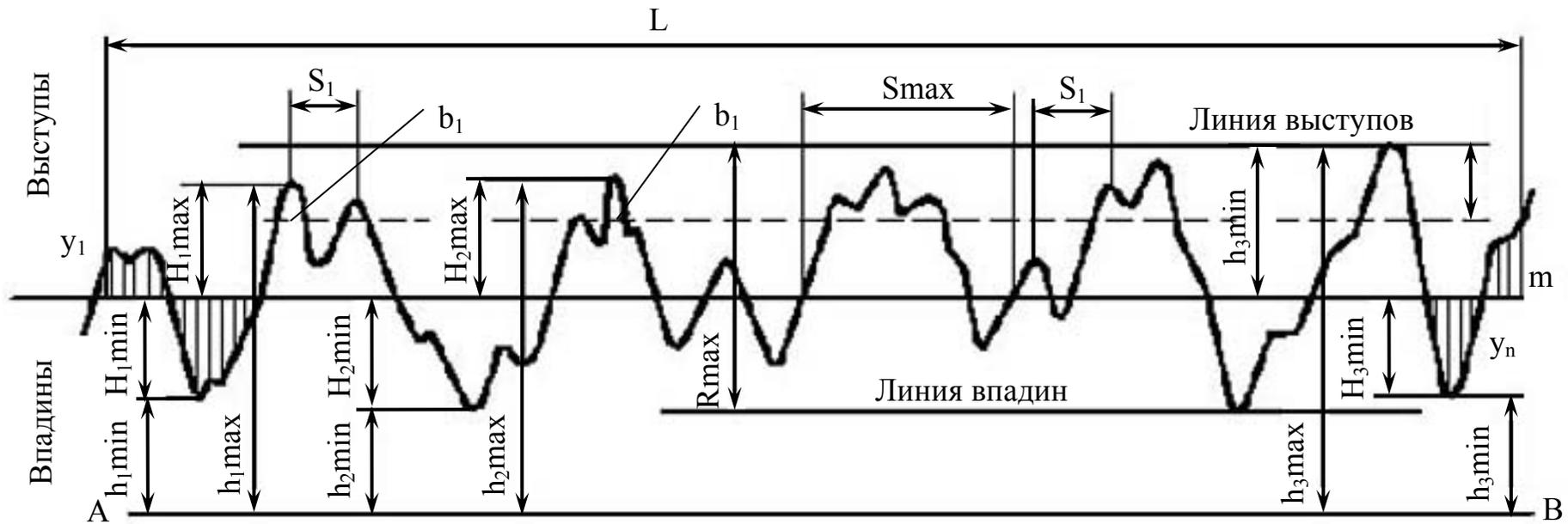


Рис. 36. Параметры шероховатой поверхности

Термины и определения шероховатости

Термин	Обозначение	Определение
1. Номинальная поверхность		Поверхность, заданная в технической документации без учета допускаемых отклонений
2. Базовая длина (поверхность)		Линия (поверхность) заданной геометрической формы, определенным образом проведенная относительно профиля (поверхности) и служащая для оценки геометрических параметров шероховатости.
3. Нормальное сечение		Сечение, перпендикулярное базовой поверхности.
4. Базовая поверхность	L	Длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности.
5. Средняя линия профиля	m	Базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально.
6. Выступы профиля		Часть реального профиля, соединяющая две соседние точки пересечения его со средней линией профиля, направленная из тела.
7. Впадина профиля		Часть реального профиля, соединяющая две соседние точки пересечения его со средней линией и направленная в тело.
8. Линия выступов профиля		Линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины.

9. Линия впадин профиля		Линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины.
10. Неровность профиля		Выступ профиля и сопряженная с ним впадина профиля.
11. Направление неровностей поверхности		Условный рисунок, образованный нормальными проекциями экстремальных точек неровностей поверхности на среднюю поверхность.
12. Шероховатость поверхности		Совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины.
13. Шаг неровностей поверхности		Отрезок средней линии профиля, ограничивающий неровность профиля.
14. Шаг местных выступов профиля		Длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних местных выступов профиля.
15. Средний шаг неровностей профиля	S_M	Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины.
16. Средний шаг местных выступов профиля	S	Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины.
17. Высота неровностей профиля по десяти точкам	R_Z	Сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины. $R_Z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{рmi} + \sum_{i=1}^5 y_{вmi} }{5}$, где $y_{рmi}$ - высота i -го наибольшего выступа профиля; $y_{вmi}$ – глубина i -й наибольшей впадины профиля.

18. Наибольшая высота профиля	R_{\max}	Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.
19. Отклонение профиля	y	Расстояние между любой точкой профиля и средней линией.
20. Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	Среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины. $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y dx, \text{ или } R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y ,$ <p>где: l - базовая длина, n – число выбранных точек профиля на базовой длине.</p>
21. Опорная длина профиля	η_p	Сумма длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантой средней линии.
22. Относительная опорная длина профиля	T_p	Отношение опорной длины профиля к базовой длине. $t_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}.$
23. Уровень сечения профиля	r	Расстояние между линией выступов и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля.

Все методы определения параметров профиля шероховатой поверхности можно разделить на контактную и бесконтактную группы. К первой группе относятся механические методы, в основе которых лежит ощупывание поверхности с помощью иглы, ко второй – оптические, позволяющие оценить высоту микронеровности и размеры шага. Здесь возможно использование, например, двойного микроскопа МИС–11 и микроинтерферометров МИИ – 4 и МИИ – 9, а также устройств на основе «косого» освещения шероховатой поверхности.

Для оптического стекла простая оценка шероховатости поверхности бесконтактным методом может быть выполнена с использованием зеркальных свойств шероховатой поверхности. Зеркальная составляющая света, отраженного от шероховатой поверхности, возникает при углах падения света свыше 70° . Можно наблюдать изображение источника,

полученное в схеме с отражением от шероховатой поверхности. Схема оценки шероховатости в визуальном варианте представлена на рис. 37.

Свет от источника через диафрагму малого диаметра падает на поверхность под углом φ и после отражения попадает в глаз наблюдателя. Непрозрачный экран позволяет избежать прямого попадания света в глаз наблюдателя. Увеличивая угол φ , следует определить момент, когда возникает резкое изображение источника.

Наблюдение достаточно резкого изображения источника в приведенной схеме будет осуществляться, когда максимальная разность хода лучей, участвующих в построении изображения, не превышает $\lambda/4$. Это условие можно записать в следующем виде $2h \cdot \cos\varphi \leq \lambda/4$, где h – высота неровностей от дна впадины до вершины, φ – угол падения света от источника, выделяемый в схеме для построения изображения источника, λ – рабочая длина волны.

Качество наблюдаемого изображения улучшается с ростом угла. В качестве диафрагмы можно использовать отверстие малого диаметра, щель или какой-либо другой тест-объект, удобный для наблюдения и оценки качества изображения.

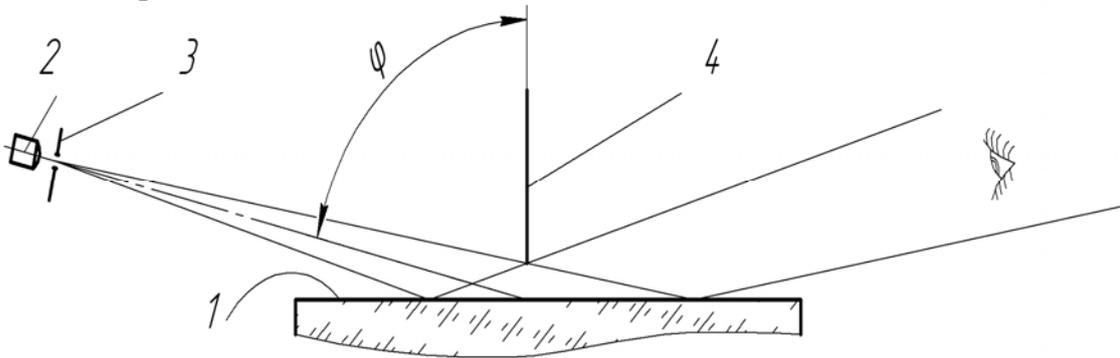


Рис. 37. Схема оценки шероховатости поверхности с использованием зеркальных свойств, при больших углах падения света;

1 – контролируемая шероховатая поверхность, 2 – источник света, 3 – "точечная" диафрагма, 4 – непрозрачный экран.

Микроинтерферометрами называют интерферометры, предназначенные для измерения высоты микронеровностей или следов обработки на металлических и других поверхностях высоких классов частоты.

Большинство тонких слоев на поверхности оптических деталей (оксидные пленки, металлические покрытия и др.) имеют толщину 1 мкм и менее. В этом случае она может измеряться интерференционными методами, реализованными, например, в МИИ – 4 на принципе двулучевой интерференции.

Микроинтерферометр МИИ – 4 предназначен для визуальной оценки и измерения параметров шероховатости поверхности R_{\max} , R_z , а также для фотографирования поверхности и ее интерферограммы.

Как и при контроле формы поверхности, измерение высоты микронеровностей производят по искривлению интерференционных полос. Но оптический прибор, предназначенный для различения мелких неровностей на поверхности, должен обладать большим увеличением и высокой разрешающей способностью. Поэтому микроинтерферометры представляют собой сочетание интерферометра и микроскопа.

Оптическая схема микроинтерферометра МИИ – 4 дана на рис. 38. Нить лампы накаливания 1 проецируется линзой 2 в плоскость апертурной диафрагмы 4, в результате чего равномерно освещается диафрагма поля зрения 5, помещенная в фокальной плоскости объектива 6. Светофильтры 3 позволяют работать не только в белом, но и в монохроматическом свете (зеленом и оранжевом). Пластина 9 с полупрозрачным покрытием разделяет падающий на нее параллельный пучок на два пучка. Один из них собирается микрообъективом 7 на поверхности контролируемой детали 8, образуя изображение диафрагмы 5, а второй проходит через компенсационную пластину 10 и дает изображение диафрагмы 5 на поверхности зеркала 12, установленного в фокальной плоскости микрообъектива 11. После

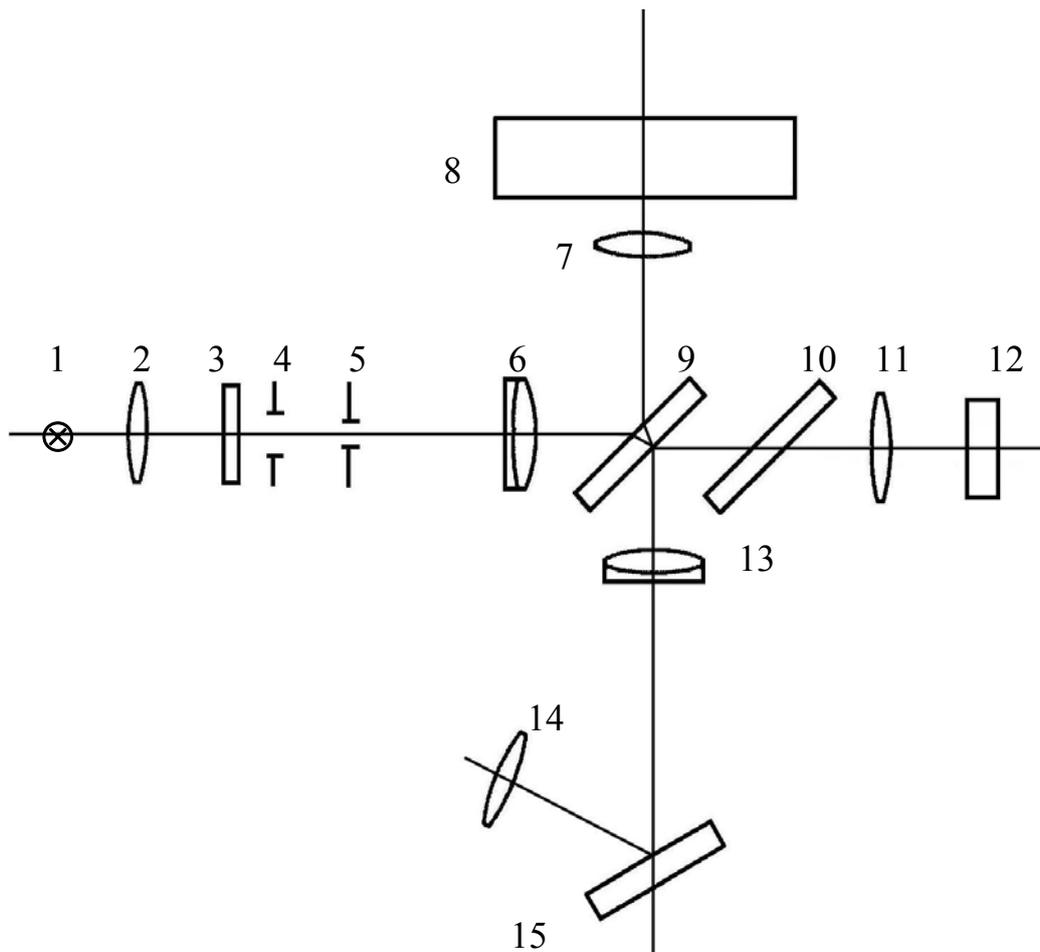


Рис. 38

отражения от поверхностей 8 и 12 оба пучка идут обратно по прежним направлениям и соединяются пластиной 9. Объектив зрительной трубы 13 и зеркало 15 образуют два наложенных друг на друга изображения диафрагмы 5 в фокальной плоскости винтового окулярного микрометра 14. Правильная настройка прибора обеспечивает наблюдение в поле зрения окуляра системы интерференционных полос. Увеличение микроскопа, составленного из объективов 7 и 13 и окуляра 14, равно 500^{\times} , а диаметр поля зрения на поверхности 8 составляет 0,3мм.

Получить в поле зрения окуляра полосы требуемой ширины можно двумя способами. Первый заключается в наклоне зеркала 12 или контролируемой детали 8 на некоторый угол α . Второй способ состоит в смещении микрообъектива 7 или 11 перпендикулярно оптической оси на малый отрезок.

В микроинтерферометре МИИ – 4 деталь 8 кладут контролируемой поверхностью вниз на предметный стол с отверстием. При сборке прибора поверхность стола устанавливают перпендикулярно к оси объектива 7. Регулировку ширины полос в процессе работы с прибором производят микрометричным смещением объектива 11 перпендикулярно к оптической оси, а изменение направления полос – поворотом объектива вокруг его оси.

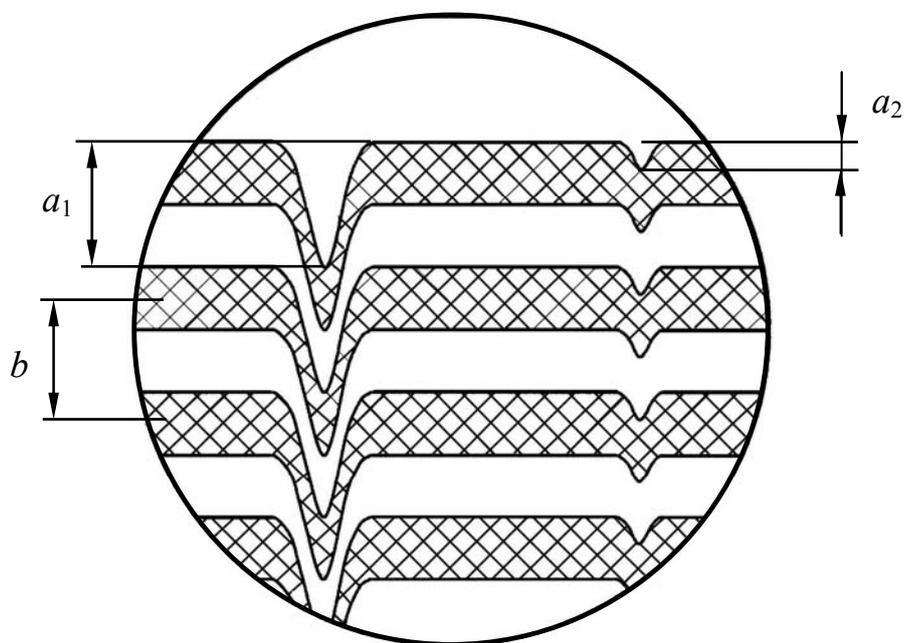


Рис. 39. Вид поля зрения микроинтерферометра при измерении высот микронеровностей поверхности

Наличие на контролируемой поверхности царапин или следов механической обработки вызывает местные искривления полос рис. 39, форма которых повторяет в измененном масштабе профиль поверхности. Деталь 8 устанавливают так, чтобы штрихи на ее поверхности были направлены перпендикулярно полосам. Глубину штрихов вычисляют по формуле $h = \frac{\lambda a}{2b} = 0.27a/b$, (32)

где a – искривление полосы на изображении штриха, b – ширина полосы. Величины a и b измеряют с помощью окулярного микрометра: $a = x_1 - x_2$, $b = x_3 - x_4$, где x_1, x_2, x_3, x_4 – отсчеты соответствующих координат полос по окулярному микрометру в соответствии с рис.39. При этом погрешность определения отношения a/b получается примерно равной 0,05. а соответствующая погрешность измерения $\delta h = 0,015$ мкм.

В случае, показанном на рис. 39, на рассматриваемом участке поверхности имеются два штриха (царапины). На штрихе 1 имеем: $a_1 \approx b$ и $h_1 = 0.27$ мкм; на штрихе 2 соответственно: $a_2 = 0,2b$ и $h_2 = 0.06$ мкм. По измеренным значениям h для ряда штрихов определяют величину R_z или R_{\max} , которые характеризуют шероховатость поверхности.

Если на части контролируемой поверхности присутствует пленка некоторой толщины, то неровность имеет профиль ступеньки, на которой интерференционные полосы претерпевают разрыв. Для измерения высоты такой ступеньки с помощью окулярного микрометра измеряют величину разрыва полосы - расстояние a_{12} (рис. 40) между двумя частями ахроматической (темной) полосы. Ширина полосы b будет определена точнее, если измерить расстояние между 4...5 полосами, а затем разделить его на число k интервалов между измеряемыми полосами.

$$\text{Тогда } a_{12} = x_1 - x_2, \quad b = \frac{x_3 - x_4}{k},$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – отсчеты соответствующих координат полос по окулярному микрометру для картины, показанной на рис. 40, (число интервалов k на рисунке – $k = 4$). Далее, высоту ступеньки h_c вычисляют по формуле:

$$h_c = \frac{\lambda a_{12}}{2b}. \quad (33)$$

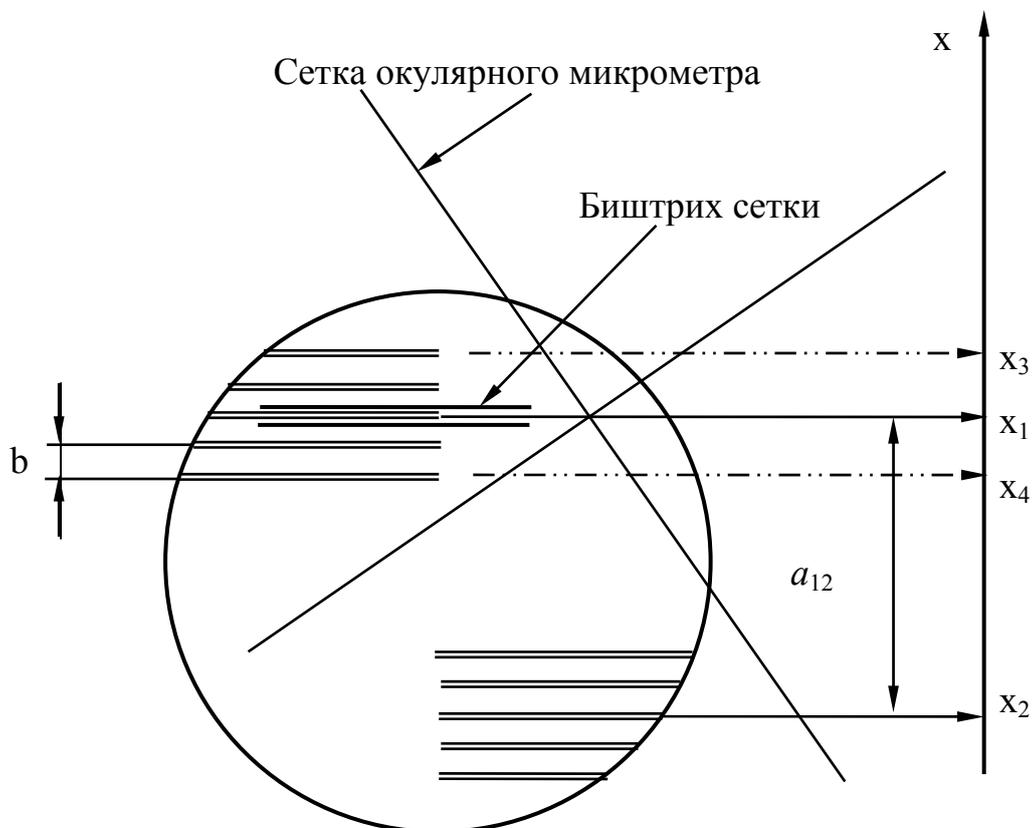


Рис. 40

Содержание работы

1. Изучить принцип работы микроинтерферометров МИИ – 4 и МИИ – 9.
2. Произвести измерение шероховатости поверхности.
3. Измерить толщину оптического покрытия.

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Подготовка к работе.

1.1. Включить блок питания в сеть, а затем тумблером на блоке питания включить лампу.

1.2. Положить на столик интерферометра рис. 41, контролируемый образец.

1.3. С помощью микрометрического винта 28 установить резкое изображение объекта измерений.

1.4. Перемещая столик прибора, с помощью микрометрических винтов 23, установить границу ступеньки посередине поля зрения.

1.5. С помощью рукоятки 34 открыть шторку, перекрывающую одну из ветвей интерферометра.

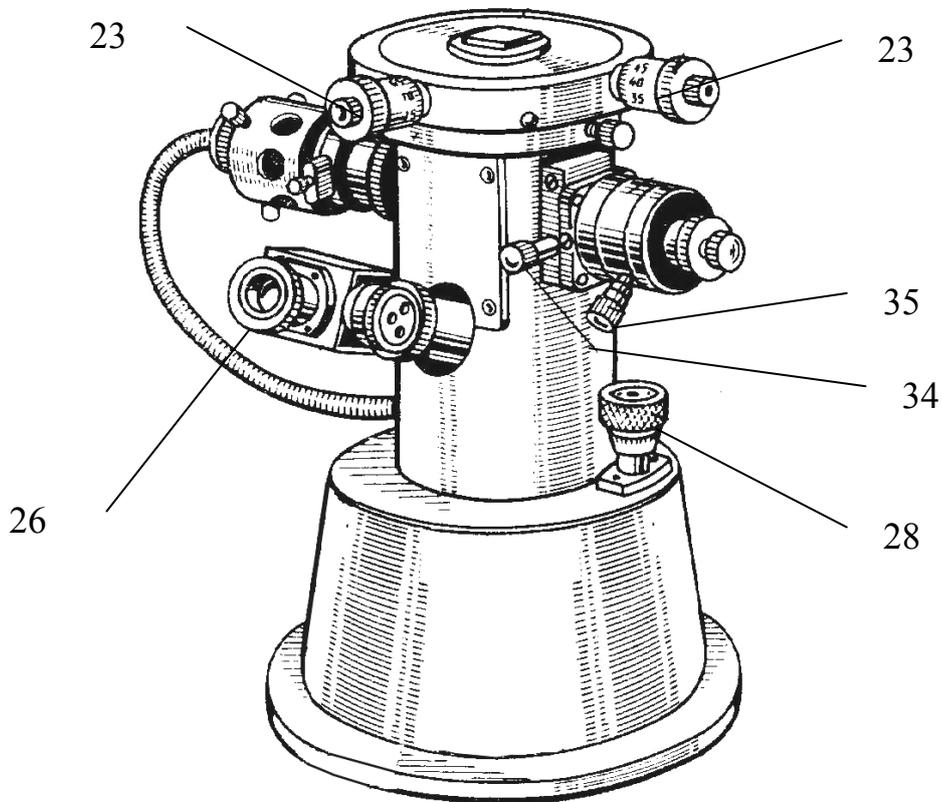


Рис. 41

1.6.С помощью винта 35, поворачивая его вокруг интерференционной головки, ориентировать полосы перпендикулярно границе ступеньки. Ширина полос изменяется вращением этого винта вокруг оси.

1.7.Поворотом окулярного микрометра вокруг его оптической оси установить биштрих сетки параллельно интерференционным полосам.

2.Проведение измерений неровностей поверхности.

2.1.Вращением барабана окулярного микрометра биштрих сетки последовательно совмещают с выбранными участками интерференционных полос, подобно показанному на рис. 39 и записывают их координаты – отсчеты с окулярного микрометра.

2.2.По формуле (33) вычисляют высоту неровностей.

3.Проведение измерений толщины пленок

3.1.Вращением барабана окулярного микрометра биштрих сетки последовательно совмещают с выбранными участками интерференционных полос, подобно показанному на рис. 39 и записывают их координаты – отсчеты с окулярного микрометра.

3.2. По формуле (33) вычисляют высоту ступеньки профиля контролируемой поверхности – толщину пленки.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Оптическую схему микроинтерферометра.
2. Основные расчетные формулы.
3. Рисунки интерференционных картин с указанными на них положениями бисектора окулярного микрометра и соответствующими отсчетами координат.
4. Расчеты высот микронеровностей и толщины пленки.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как можно классифицировать методы определения шероховатости поверхностей?
2. Можно ли с помощью микроинтерферометра МИИ – 4 определять шероховатость полированных поверхностей?

Список литературы

1. Дудин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М., Машиностроение, 1978.
2. Кучин А.А., Обрадович К.А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности. Л., Машиностроение, 1981.
3. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Л., Машиностроение, 1976.
4. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Цель работы: – изучение метода контроля геометрических параметров оптических деталей на вертикальном длинномере ИЗВ-21.

ИЗВ-21 представляет собой оптический штриховой измерительный прибор, работающий по принципу продольного компаратора, и служит для измерения наружных размеров при максимальной высоте измеряемого предмета до 100мм.

Вертикальный измеритель пиноль с установленной на нем стеклянной миллиметровой шкалой касается измерительным наконечником поверхности измерительного столика или установленной на столик детали. Перемещение миллиметровой шкалы при измерении определяется отсчетом по микроскопу 60^{\times} увеличения и спиральному окуляру - микрометру с точностью до 0,001мм (причем возможна оценка на глаз десятых долей микрометра).

При измерениях на вертикальном длинномере полностью соблюдается принцип Аббе: подлежащая измерению длина представляет прямолинейное продолжение шкалы, служащей для измерения, что обеспечивает получение минимальных ошибок измерения.

С целью соблюдения этого принципа плоскость делений миллиметровой шкалы совпадает с осью пиноля и измерительного наконечника, и шкала выверена точно параллельно направлению движения измерительного пиноля.

Легкое и почти свободное от трения движение измерительного пиноля обеспечивается применением направляющих шарикоподшипников.

На приборе могут производиться измерения:

1. рабочих калибров всех классов точности;
2. контрольных калибров для большинства посадок второго класса и всех посадок более грубых классов точности;
3. изделий всех классов точности.

Описание прибора

Наружный вид прибора показан на рис. 42.

Измеритель длин на вертикальном штативе состоит из трех основных механических частей:

- а) вертикальный штатив;
- б) измерительная головка;
- в) измерительный пиноль с измерительным наконечником.

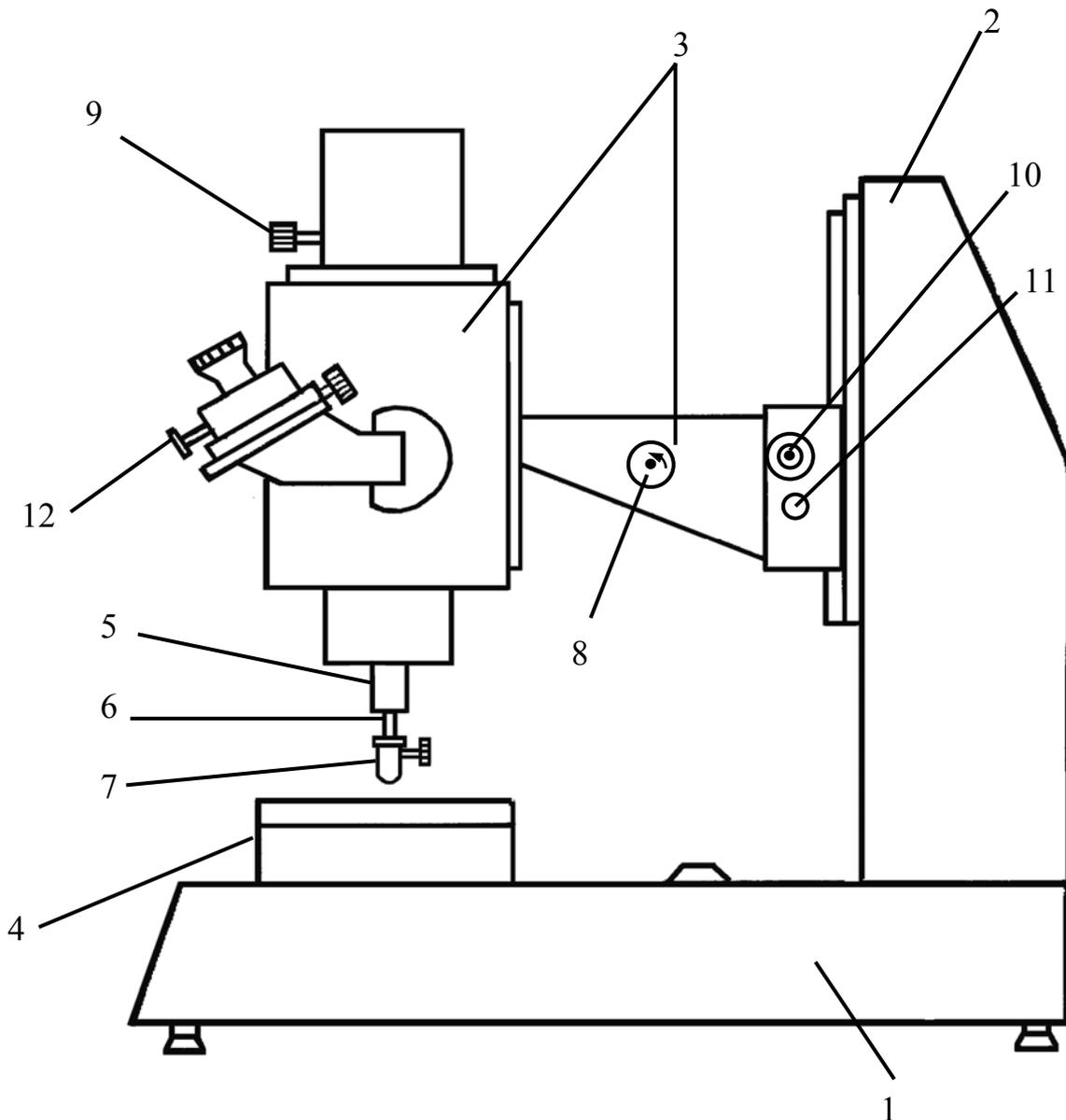


Рис. 42

В устойчивое основание 1 запрессована колонка 2, служащая для подъема или опускания всей измерительной головки 3 с помощью винтов 10 и 11.

На основании закреплен измерительный столик 4 с рифленой поверхностью, на которую устанавливают измеряемые объекты.

На поверхности измерительного столика имеется три резьбовых отверстия, которые служат для крепления различных регулируемых и специальных столиков, обычно применяемых в ряде измерительных приборов на вертикальном штативе.

Внутри измерительного пиноля 5 установлена основная миллиметровая стеклянная шкала.

На измерительный штифт 6 крепятся измерительные наконечники 7.

Измерительный пиноль поднимается с помощью винта 8. Пиноль фиксируется в любом положении зажимным винтом 9.

Устройство оптической части прибора показано на рис. 43.

Оптическая схема состоит из следующих элементов:

13 – лампа накаливания;

14 – светофильтр;

15 – конденсор;

16 – защитное стекло;

17 – основная миллиметровая шкала;

18 – окуляр спирального окулярного микрометра;

19 – подвижная пластинка со шкалой в виде спирали Архимеда;

20, 21 – призмы, отклоняющие пучок соответственно на 90° и 45° ;

22 – объектив микроскопа;

23 – неподвижная пластинка со шкалой десятых долей миллиметра и индексом.

На основной шкале, установленной внутри пиноля, нанесено 100 миллиметровых делений.

Изображение миллиметровой шкалы 17 совмещается в поле зрения микроскопа с помещенным в окуляре двумя дополнительными шкалами 19 и 20.

Одна из них – вертикальная 23 (рис. 44) имеет деления от 0 до 10, каждое деление равно одной десятой миллиметра. Вверху этой шкалы есть индекс 24.

На второй пластинке 19 имеются десять витков двойных штрихов шкалы со спиралью Архимеда и сто делений круговой шкалы 26. Эти шкалы приводятся во вращение маховичком 12 (рис. 42). Каждому витку круговой шкалы 26 соответствует одна тысячная миллиметра или один микрон. Видимый в поле зрения интервал между делениями круговой шкалы достаточно большой, можно производить оценку на глаз десятых долей микрона.

Содержание работы

В процессе выполнения работы необходимо проконтролировать геометрические параметры оптических деталей и рабочих калибров.

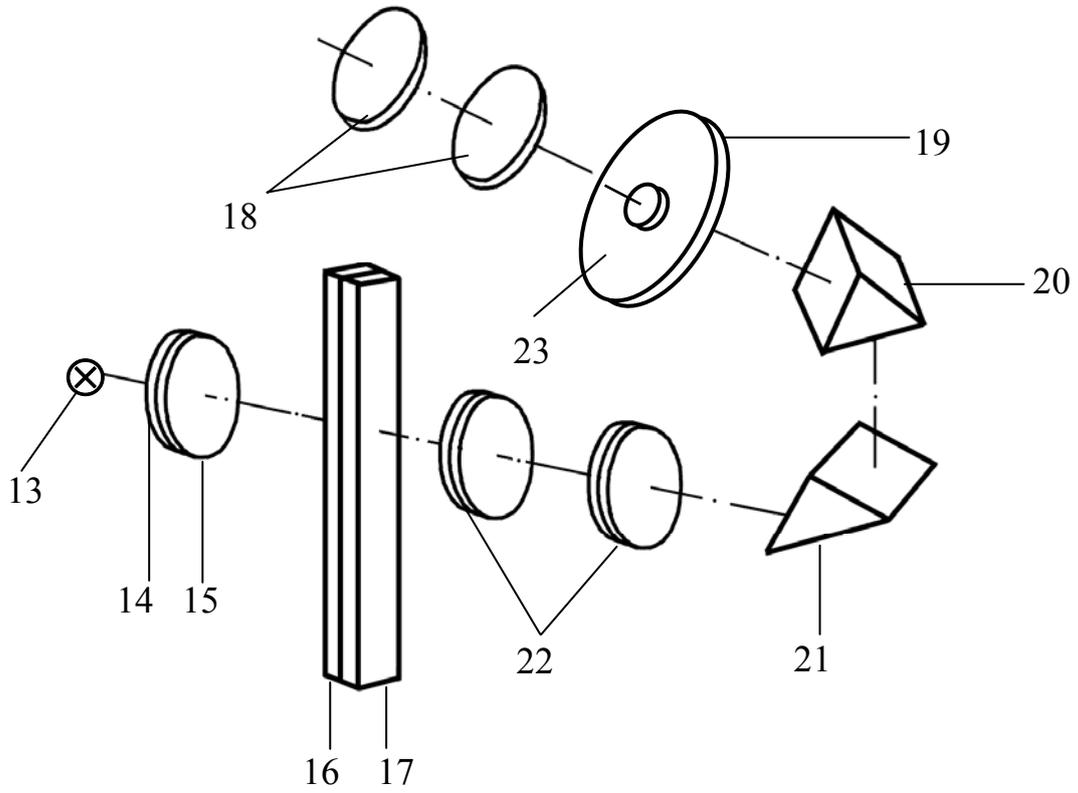


Рис. 43

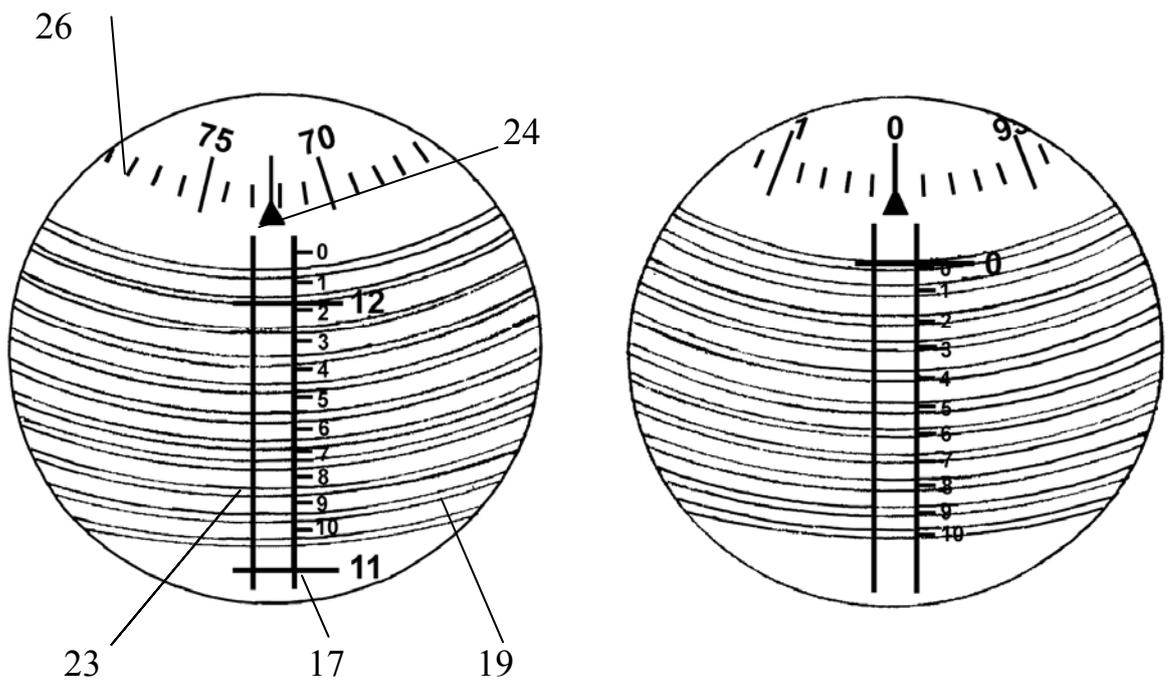


Рис. 44

Методические указания к выполнению работы

Измерительный наконечник насаживается на измерительный штифт до упора и закрепляется винтом. Освобождается зажимной винт 9 (рис. 42).

Пиноль опускается вниз, пока измерительный наконечник не коснется поверхности стола. Вращением маховика 12 стрелку индекса совмещают со штрихом «0» круговой шкалы 26 (рис. 44). С помощью винтов 10 и 11 (рис. 42) опускают или поднимают измерительную головку 3, добиваясь того, чтобы нулевой штрих миллиметровой шкалы 17 (рис. 44) стал точно симметрично между двойными штрихами начального витка спирали шкалы 19, у деления «0» вертикальной неподвижной шкалы 23 десятых долей миллиметра.

Эту установку миллиметрового штриха на середину, между двойными штрихами начального витка спирали, нужно производить особенно тщательно, так как от этого, в значительной мере, зависит точность результата измерения.

После установки на ноль винтом 8 поднимают измерительный пиноль. Тщательно очищенный измеряемый объект устанавливается на столик, пиноль опускается вниз, до тех пор, пока измерительный наконечник не коснется объекта. Производится отсчет. Измерения повторить 5 раз.

При снятии отсчета индексом для делений основной миллиметровой шкалы служит начальный (нулевой) штрих неподвижной вертикальной шкалы десятых долей миллиметра. Если в поле зрения окуляра штрих миллиметровой шкалы расположен ниже этого индекса, это означает, что данный миллиметровый штрих уже прошел индекс, а ближайший, больший по порядку, миллиметровый штрих еще не дошел до индекса. Сколько в отсчете целых десятых долей миллиметра, показывает цифра последнего, уже пройденного, штриха вертикальной неподвижной шкалы десятых долей миллиметра. По круговой шкале производится отсчет сотых и тысячных долей миллиметра и оцениваются на глаз десятитысячные доли.

Каждый отсчет положения пиноля производится следующим образом:

Сначала вращают спиральную шкалу при помощи маховика 12 (рис. 42) так, чтобы расположенный между витками спирали миллиметровый штрих занял симметричное положение между двойными штрихами витка спирали. Затем производится отсчет. Рассмотрим пример на рис. 44. Полный отсчет составляет 12,2725. Полученная величина складывается из последовательно выполненных операций считывания по шкалам:

- а) целые миллиметр 12,0000;
- б) число десятых долей миллиметра – цифра уже пройденных миллиметровым штрихом делений вертикальной шкалы десятых 0,2000;
- в) сотые и тысячные доли – по положению круговой шкалы относительно верхней стрелки отсчетного индекса 0,0720;
- г) на глаз оцениваются десятитысячные доли миллиметра 0,0005.

Порядок выполнения работы

1. Включить прибор и проверить освещенность шкал.
2. Установить нулевые отсчеты шкал.
3. Определить размеры концевых мер.
4. Измерить указанные на чертеже геометрические параметры оптических деталей.
5. Произвести расчет погрешностей.
6. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Оптическую схему прибора.
2. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
3. Данные по точности определение геометрических параметров.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип Аббе при выполнении измерений?
2. С какой точностью производятся измерения на ИЗВ-21?

Список литературы

1. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1986.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: – изучение метода определения, практическое измерение и расчет микротвердости поверхности оптических материалов.

Основным свойством оптических материалов, определяющим их обрабатываемость при шлифовании, является твердость – способность материала сопротивляться проникновению в него другого тела. Различают склерометрическую, определяемую по шкале Мооса, абразивную – по скорости сошлифовывания и твердость очень малых объемов материала, определяемую по величине отпечатка, полученного в результате вдавливания в материал индентора в виде пирамиды – микротвердость.

Измерения микротвердости производят при определении твердости отдельных микроструктурных составляющих, а также при определении твердости тонких поверхностных слоев и деталей малых размеров. Твердость поверхностных слоев и покрытий можно оценивать по количеству и характеру расположения трещин вокруг отпечатка.

Описание прибора ПМТ-3

Микротвердомер ПМТ-3 представляет собой микроскоп, предназначенный для измерения микротвердости металлов, сплавов, стекла, керамики и других материалов. Метод измерения основан на вдавливании индентора в виде алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой и измерении линейной величины диагонали полученного отпечатка. Число твердости H определяется как частной от деления нагрузки P в кг на площадь боковой поверхности в мм^2 исходя из предположения, что углы отпечатка соответствуют углам пирамиды: $H = \frac{P}{S}$

Внешний вид прибора представлен на рис.45. Штатив состоит из основания 1 и колонки 2, имеющей снаружи ленточную резьбу для перемещения в вертикальном направлении кронштейна 3 с тубусом 4. На кронштейне размещены механизмы перемещения: винт 6 – грубой подачи и микрометрический винт 5. Предметный столик 7 размещен на основании штатива. Верхняя часть столика может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи винтов 8. Отпустив стопорный винт 9 можно рукояткой 10 поворачивать столик от упора до упора.

Механизм нагружения состоит из штока, укрепленного на двух пружинах, расположенных внутри корпуса механизма. На штоке расположена оправка 11 с алмазной пирамидой. При нагружении на утолщенную часть штока устанавливается гиря из набора разновесов. Для получения отпечатка шток опускают плавным вращением рукоятки 17 арретира против часовой стрелки. На тубусе микроскопа укреплен осветитель, снабженный светофильтрами 13, предназначенными для повышения контрастности поля зрения. Питание осветителя осуществляется от сети через трансформатор 15. Поворотом рукоятки 14 можно получить изображение предмета как в светлом, так и в темном поле. На тубусе

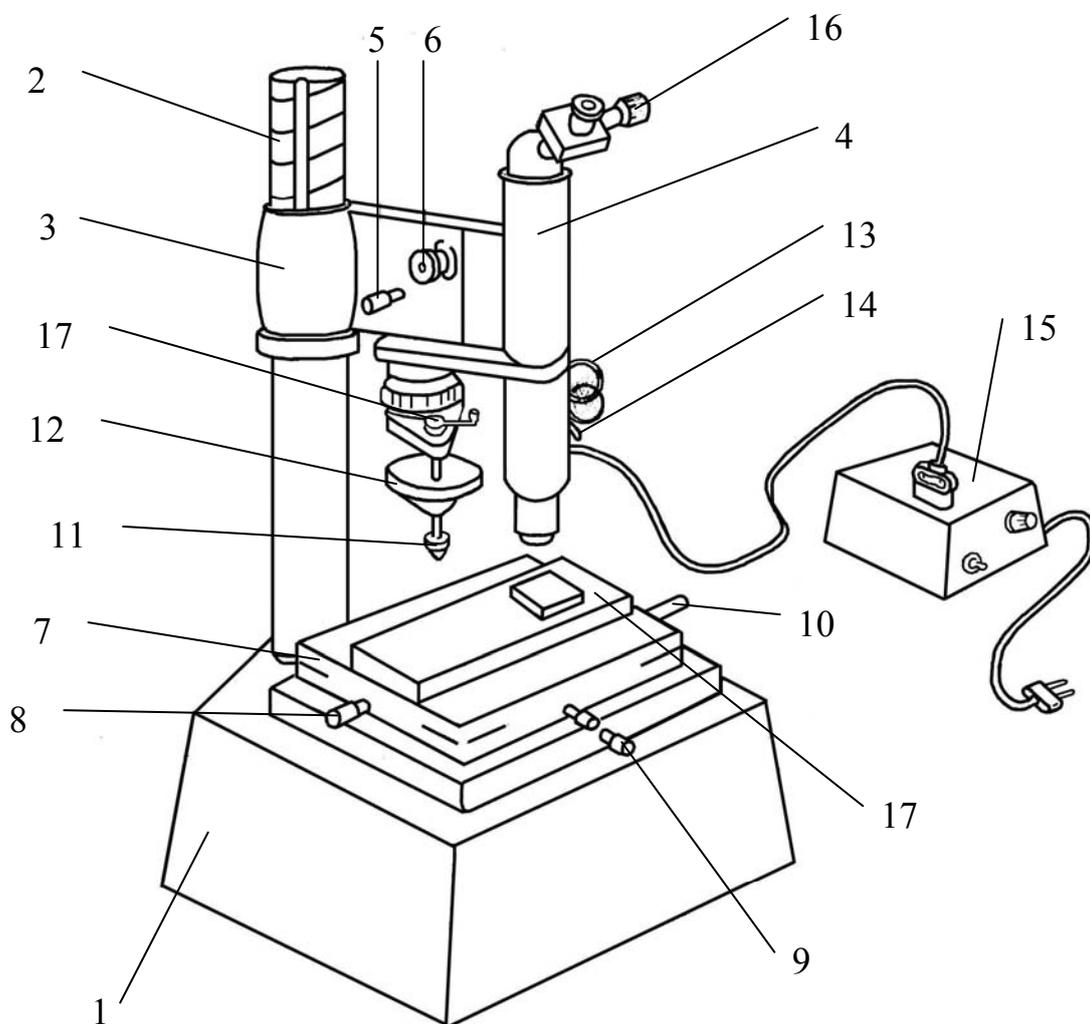


Рис. 45. Внешний вид прибора ПМТ-3 микроскопа закреплен винтовой окуляр-микрометр. Вид поля зрения показан на рис. 45.

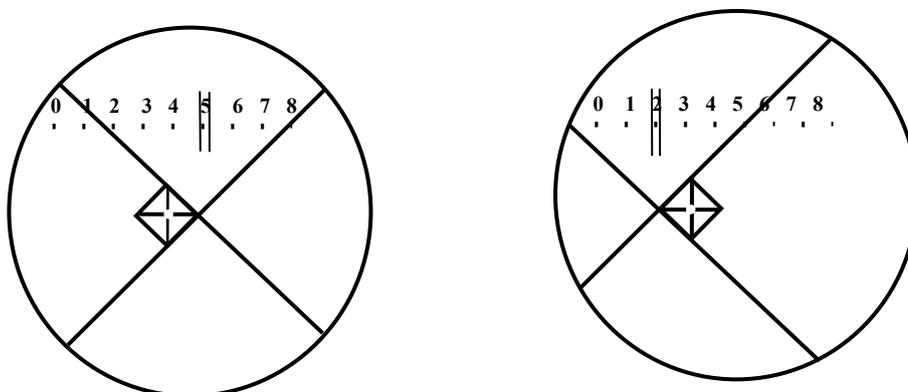


Рис. 46

Содержание работы

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо произвести измерения микротвердости материала образцов при различных нагрузках и проанализировать полученные результаты.

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Закрепить образец на предметном столике.
2. Повернуть столик до упора по часовой стрелке и сфокусировать микроскоп на поверхность предмета. Предметный столик необходимо поворачивать плавно, избегая ударов о стопорное устройство!
3. Повернуть предметный столик против часовой стрелки до упора и закрепить в этом положении винтом 9.
4. Поместить на утолщенную часть штока груз из набора разновесов.
5. Медленным (в течение 15 секунд) поворотом рукоятки 17 против часовой стрелки опустить шток так, чтобы индентор коснулся поверхности исследуемого образца. После выдержки под нагрузкой (5 секунд) повернуть рукоятку в исходное положение.
6. Повернуть столик на 180° до упора.
7. Измерить диагональ отпечатка при помощи окуляр - микрометра. Для этого винтами 8 подвести отпечаток к перекрестию (рис. 46) и произвести отсчет m_1 по измерительному барабану. Затем, вращая барабан, совместить перекрестие с противоположными сторонами отпечатка и снять отсчет m_2 . Измерение повторить не менее 5 раз. Истинная величина отпечатка: $C = (m_2 - m_1) \cdot E$ мкм, где E – цена деления барабана окуляр - микрометра. Для данного прибора $E=0,315$ мкм.
8. Данные измерений занести в таблицу.

9. Рассчитать число твердости по формуле: $H = \frac{1854 \cdot P}{C^2}$,

где H – число твердости в кг/мм²;

P – нагрузка в граммах;

C – размер диагонали отпечатка в мкм.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Главные расчетные формулы для определения микротвердости;
2. Таблицу результатов измерений;
3. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Дать определение твердости.
2. Виды твердости.
3. Методы определения твердости, микротвердости и твердости по сошлифовыванию.

Список литературы

1. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1990.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ «СВЕТОВОГО СЕЧЕНИЯ ПРОФИЛЯ»

Цель работы: - изучение конструкции и принципа работы двойного микроскопа и измерение шероховатости поверхности и толщины оптических покрытий.

У поверхностей получаемых в производственном процессе различают три вида неровностей: отклонение от правильной геометрической формы, волнистость и шероховатость. Последняя является важной эксплуатационной характеристикой, с которой связаны такие свойства поверхности, как микротвердость, прочность, коррозионная стойкость, износоустойчивость и т.д.. Шероховатость поверхности по ГОСТ 2789-73 определена как совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. Качественно шероховатая поверхность может быть охарактеризована профилем, а количественными ее характеристиками являются следующие параметры:

R_a - среднее арифметическое отклонение от средней линии профиля,

R_z - средняя разность высот между пятью наивысшими и пятью наинизшими точками профиля в пределах базовой длины;

S_m - средний шаг неровностей профиля;

S - средний шаг неровностей профиля по вершинам и т. д. Одним из методов определения шероховатости поверхности является метод «светового сечения профиля», реализованный в двойном микроскопе МИС-11.

Описание микроскопа МИС - 11

Двойной микроскоп МИС-11 предназначен для контроля качества обработки наружных поверхностей различных деталей путем измерения высоты неровностей микропрофиля. внешний вид прибора показан на рис. 47.

Основные характеристики

1. Предельные значения величин неровностей, измеряемых данным прибором, составляют 0,8мкм и 63мкм.

2. Цена деления барабана винтового окулярного микрометра в плоскости сетки окуляра - 0,01мм.

3. Пределы перемещения предметного столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях - 10мм. Цена деления барабана - 0,01мм.

4. Питание прибора производится от сети переменного тока напряжения 127 или 220В.

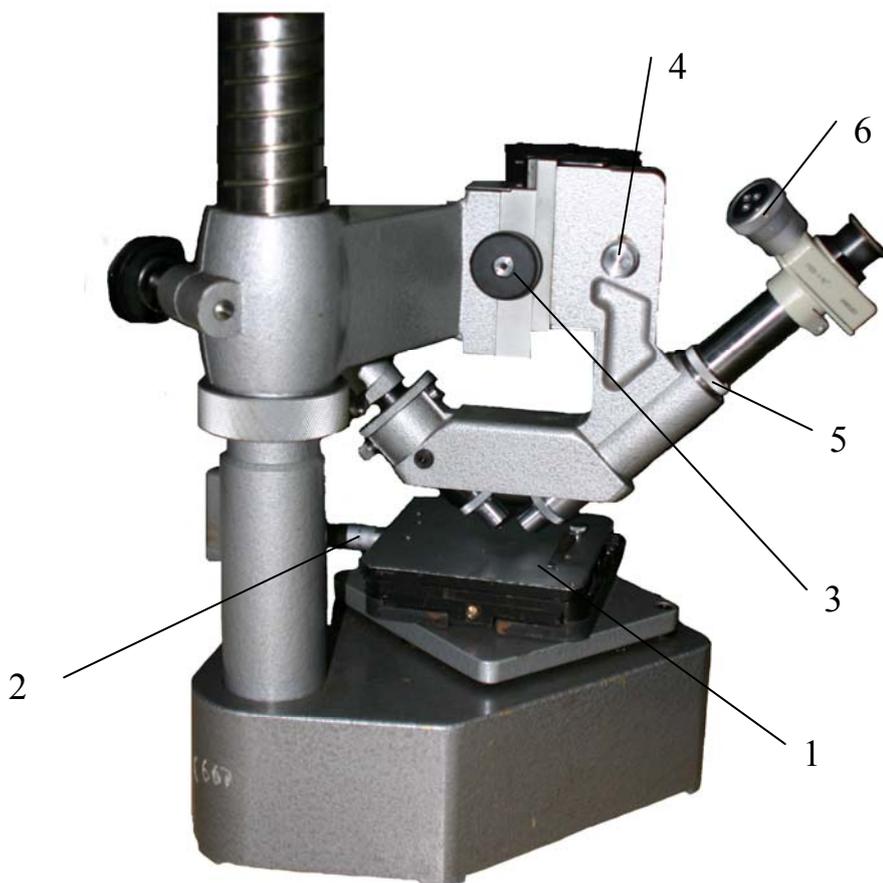


Рис. 47

В осветителе используется лампа 8В, 9Вт. Включение лампы в сеть производится через понижающий трансформатор. Двойной микроскоп представляет собой систему двух микроскопов, проектирующего и наблюдательного. Предметные точки обоих объективов совмещены друг с другом, оси микроскопов составляют между собой угол 90° , причем биссектриса этого угла совпадает с нормалью к измеряемой поверхности. Принцип действия прибора легко понять из рис. 48.

Пусть освещенная щель проектируется микроскопом на поверхность P1, имеющую ступеньку P2, высотой h . Направление падения лучей показано стрелками. Очевидно изображение щели на поверхности P1 займет положение S1, а на ступеньке P2 – положение S2.

В поле зрения наблюдательного микроскопа, ось которого расположена под углом 90° к оси проектирующего микроскопа, изображение щели будет иметь вид, представленный на рис. 49. Величина b смещения изображения S2 относительно S1 служит мерой высоты ступеньки h .

Величина смещения b определяется по формуле: $b = \sqrt{2 \cdot N \cdot h}$
 где N – увеличение объектива наблюдательного микроскопа.

$$\text{Отсюда: } h = \frac{b}{N \cdot \sqrt{2}}. \quad (34)$$

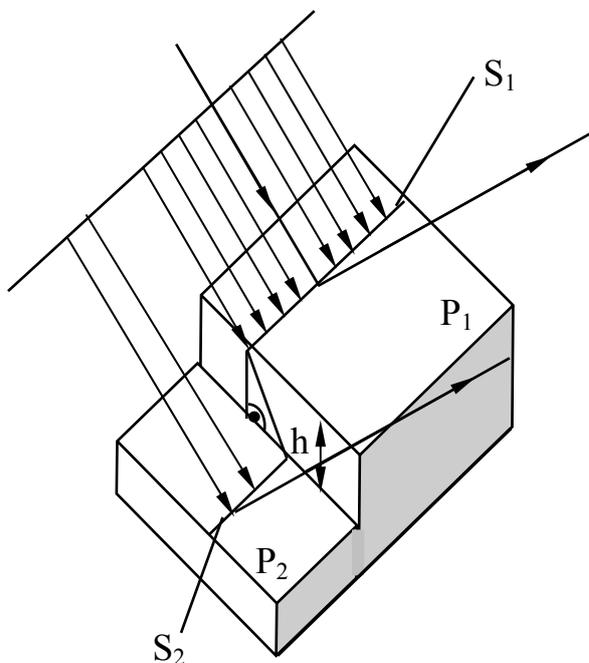


Рис. 48

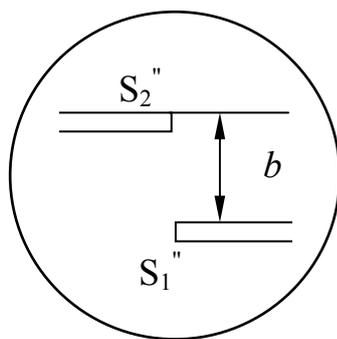


Рис. 49

Содержание работы

1. Изучить принцип работы прибора.
2. Измерить и рассчитать шероховатость поверхности образцов.
3. Определить толщину оптического покрытия на оптических деталях.

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Прежде чем производить измерения, необходимо подготовить микроскоп к работе:

Включить его через трансформатор в сеть напряжения 220 В. Установить деталь на столик 1 микроскопа (рис. 47), так что бы контролируемая поверхность была параллельна столику. Закрепить ее в держателе. Винтами 2 перемещая деталь в поле зрения микроскопа, выбрать дефект на поверхности. С помощью барашков 3 грубой подачи и барабанчика 4 микрометрического механизма наблюдательный микроскоп фокусируется таким образом, чтобы резко изображенный участок проверяемой поверхности оказался в середине поля зрения. Посредством гайки 5 производится фокусировка на измеряемую поверхность.

2. Высота измеряемого профиля определяется по формуле:
$$h = \frac{b}{N \cdot \sqrt{2}},$$

где b – величина изображения неровности профиля в плоскости сетки окуляра;

N – увеличение объектива наблюдательного микроскопа вместе с дополнительной линзой.

Для определения величины $h_{ср}$, соответствующей исследуемой поверхности, выбирается несколько неровностей, характерных для поверхности.

Измеряется высота h каждой из выбранных неровностей от вершины гребня до дна впадины и вычисляется среднее арифметическое значение высоты. Измерения произвести 5-6 раз.

Для определения величины b , соответствующей высоте h , измеряемой неровности, горизонтальная нить окулярного микрометра вращением барабана 6 последовательно сначала совмещается с верхним краем изображения неровности, а затем с нижним (рис. 49). При каждой наводке делаются соответственные отсчеты по барабану 6. Разность отсчетов дает величину $a = b \cdot \sqrt{2}$ (множитель $\sqrt{2}$ определяется тем, что направление перемещения нитей составляет угол 45° с измеряемым отрезком).

3. Для определения величины N производится контрольное измерение объект - микрометра. Объект – микрометр, представляющий собой шкалу с ценой деления 0,01мм, помещается на столик микроскопа так, что его штрихи должны быть параллельны к изображению щели (рис. 50).

На объект – микрометре выбирается наибольший участок, на котором изображение штрихов достаточно четкое. Перекрестие нитей последовательно совмещается со штрихами на краях выбранного участка объект – микрометра и производятся соответствующие отсчеты по барабанчику 33; число целых оборотов барабанчика (1 оборот барабанчика равен 100 делениям) определяется по шкале, находящейся в поле зрения окулярного микрометра. Отношение разности отсчетов по шкале и барабанчику окулярного микрометра к числу делений на выбранном участке объект – микрометра дает значение N – увеличение микрообъектива. Измерение произвести 5-6 раз.

4. Найденные величины b и N подставляются в формулу (34).

$$h = \frac{b}{N \cdot \sqrt{2}} = \frac{a}{N \cdot 2} = 0085 \cdot a. \quad (35)$$

Усреднив значения высот, вычисленных по формуле (35) для нескольких неровностей, получают величину $h_{\text{ср}}$.

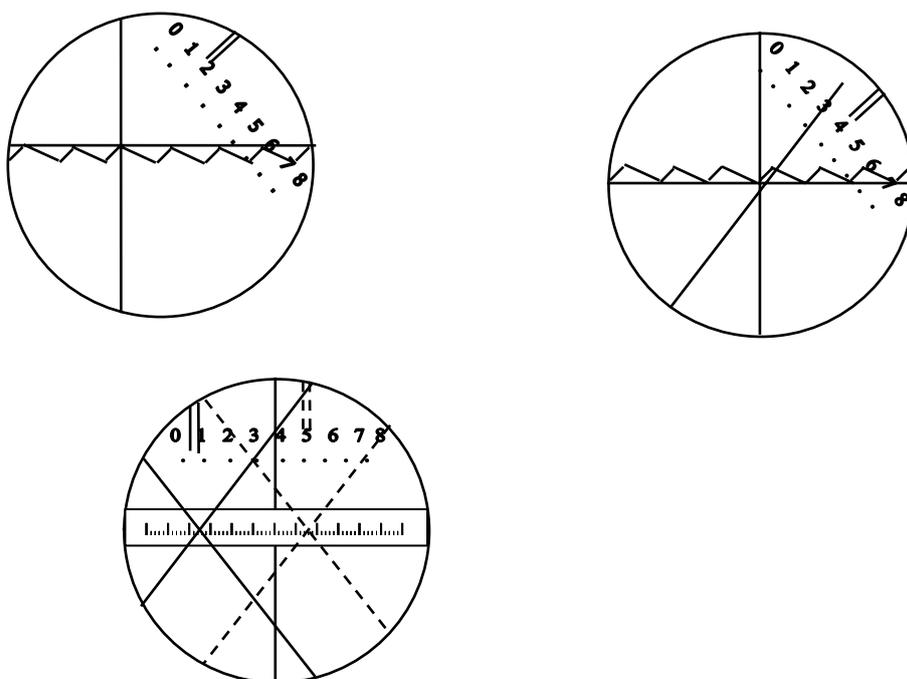


Рис. 50

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Оптическую схему прибора.
2. Результаты измерений и расчетов, сведенные в таблицу.
3. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие виды неровностей различают у поверхностей получаемых в производственном процессе?
2. Какими параметрами может быть охарактеризована шероховатая поверхность?

Список литературы

1. Дудин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978.
2. Кучин А.А., Обрадович К.А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности. Л.: Машиностроение, 1981.
3. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1989.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЕФРАКТОМЕТРЕ

Цель работы: изучение рефрактометра Аббе, измерение показателя преломления жидкостей и твердых оптических материалов.

Измерения показателя преломления различных материалов с точностью достаточной для широкого круга инженерных задач удобно проводить с помощью рефрактометров (от латинского «рефракция» – преломление). Принцип действия рефрактометров основан на измерении предельного угла преломления или на явлении полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред. Широкое распространение получил технический рефрактометр Аббе, в частности типа ИРФ-454.

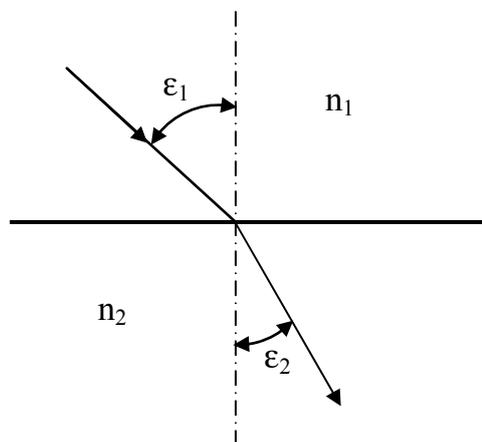


Рис. 51.

В соответствии с законом преломления для луча, проходящего границу раздела двух сред (рис. 51) имеем $n_1 \cdot \sin \varepsilon_1 = n_2 \cdot \sin \varepsilon_2$, где n_1 и n_2 показатели преломления первой и второй сред; ε_1 и ε_2 – углы падения и преломления луча. С увеличением угла падения ε_1 от нуля до $\pi/2$ если $n_1 < n_2$ (скользящий луч) угол преломления ε_2 растет от нуля до некоторого предельного значения β . В результате в преломленных лучах образуется резкая граница между светлой и темной областями. При $\varepsilon_1 = \pi/2$ имеем $\varepsilon_2 = \beta$ для которого $\sin \beta = n_1/n_2$. Следовательно, зная показатель преломления одной из сред и определяя экспериментально предельный угол можно найти показатель преломления второй среды. Метод скользящего луча, использующий понятие предельного угла преломления при переходе света из среды с меньшим показателем преломления в среду с большим показателем преломления, применяют для измерения показателей преломления прозрачных жидкостей и твердых материалов.

Показатели преломления окрашенных и полупрозрачных сред определяют в отраженном свете, используя полное внутреннее отражение. В этом случае свет падает на границу раздела двух сред со стороны оптически

более плотной среды ($n_2 < n_1$). Для углов падения ϵ_1 меньших предельного β свет частично проникает в среду с показателем преломления n_1 , а частично отражается. При $\beta \leq \epsilon_2 \leq \pi/2$ преломленный луч отсутствует и наступает полное внутреннее отражение. В результате этого в отраженных лучах образуется граница в направлениях, по которым можно наблюдать либо свет (полное отражение), либо полутень (частичное отражение). Соотношение между значениями предельного угла и показателями преломления сред остается неизменным, т.е. $\sin \beta = n_1 / n_2$.

Основной частью рефрактометра (рис. 52) являются две стеклянные призмы 1 и 3, изготовленные из стекла с большим показателем преломления. Рабочий зазор 2 между гранями A_1B_1 и AB составляет около 0,1мм и служит для помещения исследуемой жидкости. Рассмотрим действие блока призм при определении показателя преломления прозрачной жидкости методом скользящего луча.

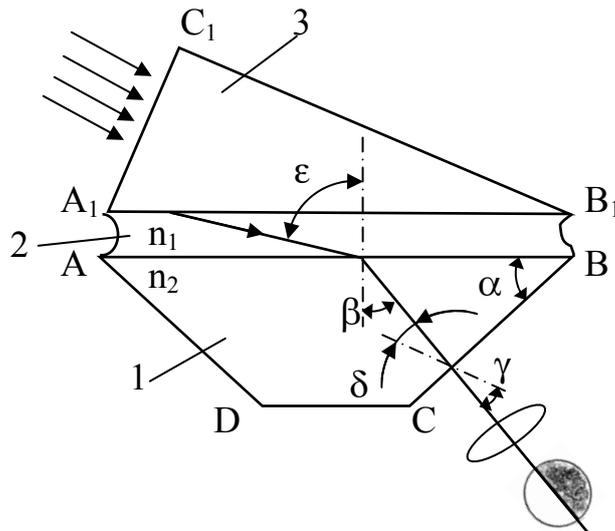


Рис. 52

Лучи света проходят осветительную призму 3, рассеиваясь на выходе матовой гранью A_1B_1 , входят в исследуемую жидкость и падают на полированную грань AB измерительной призмы 1. Поскольку на рефрактометре исследуются вещества, показатель преломления которых меньше показателя преломления n_2 измерительной призмы, то лучи всех направлений, преломившись на границе жидкости и призмы, войдут в измерительную призму 1.

Учитывая, что $\epsilon_1 = \pi/2$, дважды применяем закон преломления:

$$1/\sin \beta = n_2/n_1, \quad (36)$$

$$\sin \delta/\sin \gamma = 1/n_2, \quad (37)$$

а также учитывая, что

$$\delta = \alpha - \beta, \quad (38)$$

получим выражение, связывающее показатель преломления исследуемой жидкости с преломляющим углом измерительной призмы:

$$n_1 = \sin \alpha \cdot \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \gamma} - \cos \alpha \cdot \sin \gamma. \quad (39)$$

Свет выходящий из грани ВС попадает в объектив 4, то в его фокальной плоскости 5 наблюдается резкая граница светлого и темного полей. Эта плоскость является предметной плоскостью для окуляра, позволяющего рассматривать границу полей. Объектив с окуляром образуют зрительную трубу.

В этой же плоскости находятся изображения шкалы показателя преломления и указателей (штрих и перекрестие). В поле зрения окуляра наблюдается часть изображения шкалы и часть поля сфокусированных лучей, выходящих из призмы 1. Вращая систему призм 1 и 3 и, следовательно, изменяя наклон предельного пучка лучей относительно оси зрительной трубы, можно добиться положения, когда граница светлого и темного полей совпадает с положением указателя. При вращении системы призм поворачивается шкала показателя преломления, установленная на пластине, жестко связанной с системой призм. Значение показателя преломления отсчитывается по шкале при совпадении границы света и тени с перекрестием. Зависимость n от α по формуле (39) приводит к нелинейной шкале значений показателя преломления.

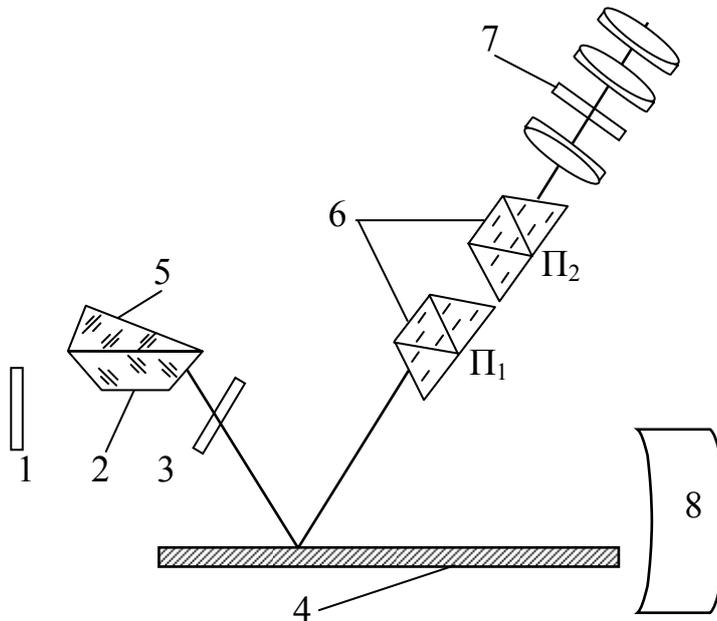


Рис. 53

На рис. 53 изображена упрощенная оптическая схема рефрактометра ИРФ-454. Зеркало 4 делает прибор более компактным, шкала 8 поворачивается вместе с блоком призм 2 и 5, за которым расположено защитное стекло 3, 6 – компенсатор.

Если источник света не является монохроматическим, то наблюдаемая в окуляре граница светлого и темного полей оказывается размытой и окрашенной из-за дисперсии показателя преломления исследуемого вещества. Для получения резкого изображения границы на пути лучей, выходящих из призмы 1 помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи (призмы Π_1 и Π_2 на рис. 53), каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитаны так, чтобы лучи с длиной волны $\lambda_D = 589.3$ нм не испытывали отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются в ту или иную сторону. Если положение призм соответствует рис. 53, то дисперсия двух призм равна удвоенной дисперсии каждой из них. При повороте одной из призм Амичи на 180° относительно другой вокруг оптической оси полная дисперсия компенсатора оказывается равной нулю, так как дисперсия одной из призм скомпенсирована дисперсией другой. В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора изменяется в пределах от нуля до удвоенного значения дисперсии одной из призм. За призмами расположена система линз с перекрестием 7.

Для поворота призм относительно друг друга служат специальная рукоятка и система конических шестерен, с помощью которых призмы одновременно поворачиваются в противоположных направлениях. Вращая ручку компенсатора следует добиться того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала достаточно резкой. Положение границы при этом соответствует волны λ_D .

В некоторых случаях, когда дисперсия исследуемого вещества особенно велика, диапазон компенсатора оказывается недостаточным и четкой границы получить не удастся. В этом случае перед осветителем рекомендуется устанавливать желтый светофильтр.

Поскольку условия, определяющий предельный угол, в методе скользящего луча и в методе полного внутреннего отражения совпадают, положение линии раздела в обоих случаях также оказывается одинаковым, лишь светлое и темное поле меняются местами.

Рефрактометр Аббе можно использовать и для измерения показателя преломления твердых материалов. И в этом случае применим как метод полного внутреннего отражения, так и метод скользящего луча. Исследуемый образец должен иметь плоскую полированную поверхность, этой поверхностью он прижимается к поверхности АВ призмы 1 (см. рис. 52), призма 3 при этом отклоняется в сторону. Для обеспечения оптического контакта в зазор между соприкасающимися поверхностями вводится слой иммерсионной жидкости, показатель преломления n_n которой удовлетворяет условию $n_1 \leq n_n \leq n_2$, где n_1 показатель преломления исследуемого образца, а n_2 – показатель преломления призмы 1.

При выполнении этого условия слой жидкости не искажает результатов измерения. Обычно для создания оптического контакта используют монобромнафталин с показателем преломления $n_D = 1,66$.

Рефрактометрические измерения проводят при входном контроле оптических материалов, при составлении иммерсионных жидкостей с заданным значением показателя преломления, при контроле состава смесей в различных технологических процессах, в частности в пищевой и фармацевтической промышленности.

Описание рефрактометра

Рефрактометр ИРФ-454 состоит из следующих основных частей (рис. 54): корпуса 2, зрительной трубы с окуляром 1 и рефрактометрического блока 3, нижняя часть которого является измерительной призмой, а верхняя – осветительной. Рефрактометрический блок жестко соединен со шкалой отсчетного устройства, расположенного внутри корпуса прибора. Чтобы найти границу раздела и совместить ее с перекрестием сетки, необходимо, вращая маховик 8, наклонить рефрактометрический блок до нужного положения. Для устранения окрашенности наблюдаемой границы раздела служит компенсатор. Маховиком 10 можно вращать призмы компенсатора одновременно в разные стороны, устраняя при этом цветную кайму границы раздела. Исследуемая жидкость подсвечивается зеркалом 6 (на рис. 54 оно показано в закрытом положении) а шкала показателей преломления – зеркалом 5. Приборная погрешность рефрактометра ИРФ-454 равна $5 \cdot 10^{-4}$.

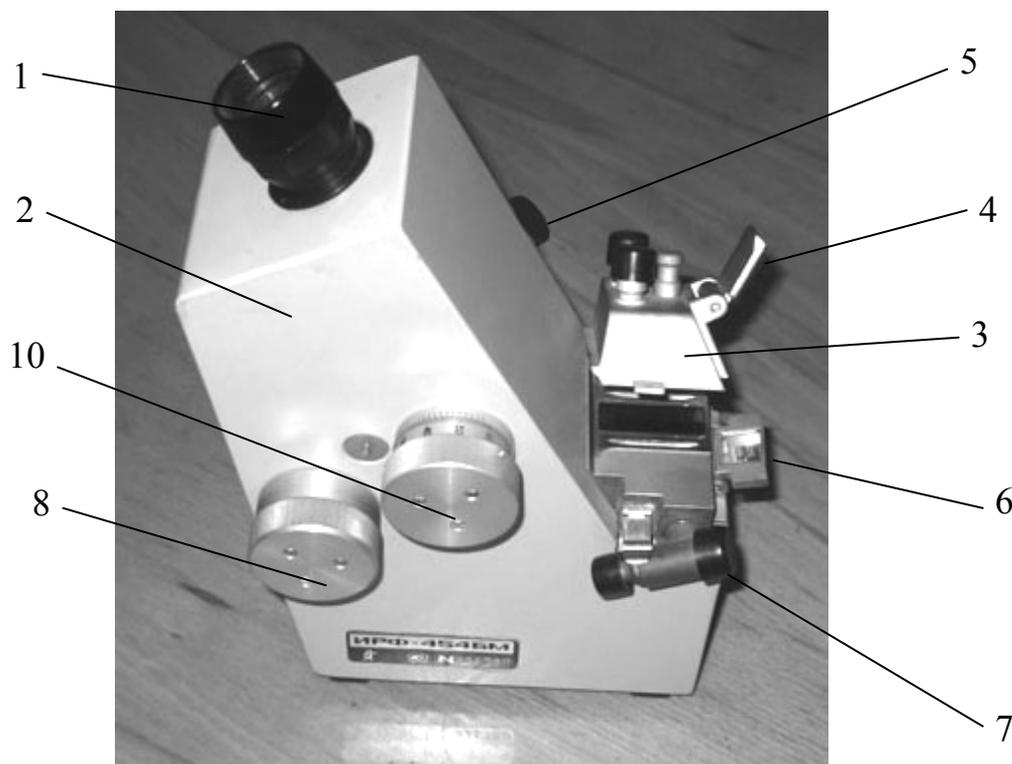


Рис. 54.

Прибор позволяет измерять показатели преломления от 1,2 до 1,7.

Порядок выполнения работы

1. Настроить прибор по дистиллированной воде, для которой показатель преломления равен 1,333.

Для этого необходимо:

а).установить зеркало 5 (см. рис. 54) по отношению к внешнему источнику света так, чтобы в окуляре 1 наблюдался ярко освещенный квадрат со шкалой; вращая окуляр получить резкое изображение шкалы;

б).отжав крюк 9 отвести вверх осветительную призму (на рис. 54 она показана в отведенном положении) и протереть поверхности измерительной и осветительной призм тампоном, смоченным в спирте; на полированную грань измерительной призмы нанести пипеткой 2..3 капли дистиллированной воды (при этом не следует касаться пипеткой призмы, чтобы не поцарапать); возвратив призму (см. рис. 54) в исходное положение, направить свет от осветителя на грань A_1C_1 верхней призмы (при измерении методом скользящего луча) через открытую заслонку 4 (см. рис. 54) или с помощью зеркала 6 (на рис. 54 обозначено 1) – на грань AD нижней призмы (при измерении по методу полного внутреннего отражения); в первом случае должно быть закрыто зеркало 6, во втором случае – заслонка 4; дистиллированная вода должна заполнить весь зазор между гранями осветительной и измерительной призм;

в).вращая маховик 8 добиться появления в поле зрения окуляра границы раздела светлого и темного полей; вращением маховика компенсатора 10 устранить цветную окрашенность границы раздела; с помощью маховика 8 установить по шкале показателей преломления значение $n = 1,333$. При этом граница раздела должна совпадать с перекрестием штрихов в окуляре. Если граница раздела не совпадает с перекрестием штрихов, то с помощью специального ключа следует выполнить совмещение (выполняется преподавателем). После этого прибор считается настроенным и можно проводить измерения.

2. Измерить показатели преломления твердых материалов (контрольной пластины и других образцов) используя как метод скользящего луча, так и метод полного внутреннего отражения. Сравнить результаты, полученные при измерении двумя способами.

Перед измерениями следует откинуть осветительную призму, повернув ее на угол 100° . Протереть поверхности измерительной призмы и образца. На полированную поверхность нанести небольшую каплю иммерсионной жидкости и наложить образец на измерительную призму. При умеренном нажиме на него иммерсионная жидкость должна распределяться равномерно по всей поверхности и не выступать за ее края. Интерференционные полосы в слое иммерсионной жидкости наблюдаются

при легких нажимах на образец, число полос должно быть не более трех. Установка образца является безупречной при одноцветной окраске плоскости соприкосновения образца и призмы. При работе по методу скользящего луча образец должен иметь полированную боковую поверхность (рис. 55), сквозь которую в него проникает свет

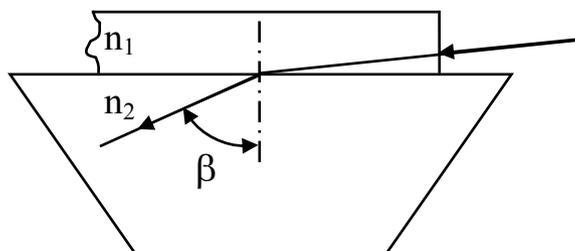


Рис. 55.

3. Измерить показатель преломления раствора глицерина в воде для ряда определенных известных концентраций раствора. Построить зависимость показателя преломления в зависимости от концентрации раствора. На основе построенной зависимости составить раствор, который должен обеспечить заданное значение показателя преломления и провести измерение показателя преломления раствора.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Оптическую схему рефрактометрического блока с пояснением принципа измерений.
2. Таблицу результатов измерений показателей преломления образцов твердых оптических материалов.
3. Таблицу и график со значениями показателей преломления раствора глицерина в воде для различных концентраций раствора. Результаты расчета концентрации раствора для обеспечения заданного значения показателя преломления.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как устроен рефрактометр Аббе?
2. Почему нижнюю поверхность осветительной призмы делают матовой?
3. Каким образом проверяют градуировку рефрактометра?
4. Каким образом в рефрактометре осуществляется компенсация дисперсии измеряемых образцов?

Список литературы

1. Кулагин С.В., Гоменюк А.С., Дикарев Н.В. и др. Оптико-механические приборы. М., Машиностроение, 1984. 352с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. Т.2, Наука 1978.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТИВОВ ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ В МАЛОРАЗМЕРНОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Цель работы: изучение схем контроля качества объективов с использованием коллиматоров, измерение концентрации энергии в малоразмерном изображении, оценка качества контролируемого объектива.

Оценка качества изготовления объективов, предназначенных для создания изображения удаленных объектов, обычно производится на оптических стендах, содержащих коллиматоры. В передней фокальной плоскости объектива коллиматора располагается какой-либо тест-объект, подсвечиваемый источником определенного спектрального состава. Световой пучок, выходящий из коллиматора, попадает в контролируемый объектив. Объектив в своей задней фокальной плоскости строит изображение тест - объекта. Качество изображения зависит от номинальных параметров объектива, установленных по результатам расчета, а также и от конструкторско-технологических погрешностей, возникающих на стадиях изготовления деталей и сборки объектива. В качестве тест-объектов используют штриховые и радиальные миры, круглые отверстия малого диаметра, узкие щели. Способ анализа изображения во многом зависит от требований, предъявляемых к объективу. В простейшем случае изображение анализируется визуально с помощью микроскопа. В более сложных случаях, а также при контроле инфракрасных объективов, анализирующий узел превращается в целую оптико-электронную систему.

Одной из наиболее информативных характеристик качества объектива является функция передачи модуляции (ФПМ) объектива. Измерение ФПМ, как правило, весьма трудоемко, связано с применением достаточно сложного оборудования, сложного математического аппарата для обработки первичной измерительной информации и выполняется для отдельных ответственных объективов.

В последнее время для многих объективов, включая объективы, предназначенные для работы совместно с матричными ПЗС, требования к качеству изображения указывают следующим образом. Для точечного изображения, построенного объективом, указывают диаметр окружности, в которую попадает определенная доля энергии от всей энергии, приходящейся на всё точечное изображение. Подобным образом, по концентрации энергии в световом пятне относительно малого размера, определяют пространственно-энергетические параметры излучения лазеров.

Методы измерений, рекомендуемые действующими стандартами, связаны с использованием сменных диафрагм различного диаметра. Через каждую диафрагму, в зависимости от диаметра, проходит определенная часть оптического излучения, участвующего в формировании

анализируемого изображения. Прошедшее через диафрагму световое излучение, регистрируется на одноэлементном фотоприемнике. Зависимость мощности или энергии светового излучения от диаметра диафрагмы дает ряд значений функции концентрации энергии. По значениям этой функции можно судить о качестве изготовления объектива, а в случае измерения параметров лазерного излучения, значения функции используют для расчета диаметра лазерного пучка и энергетической расходимости лазерного излучения.

На рис. 56 представлена схема коллиматорной установки, рекомендуемая для измерений соответствующим стандартом.

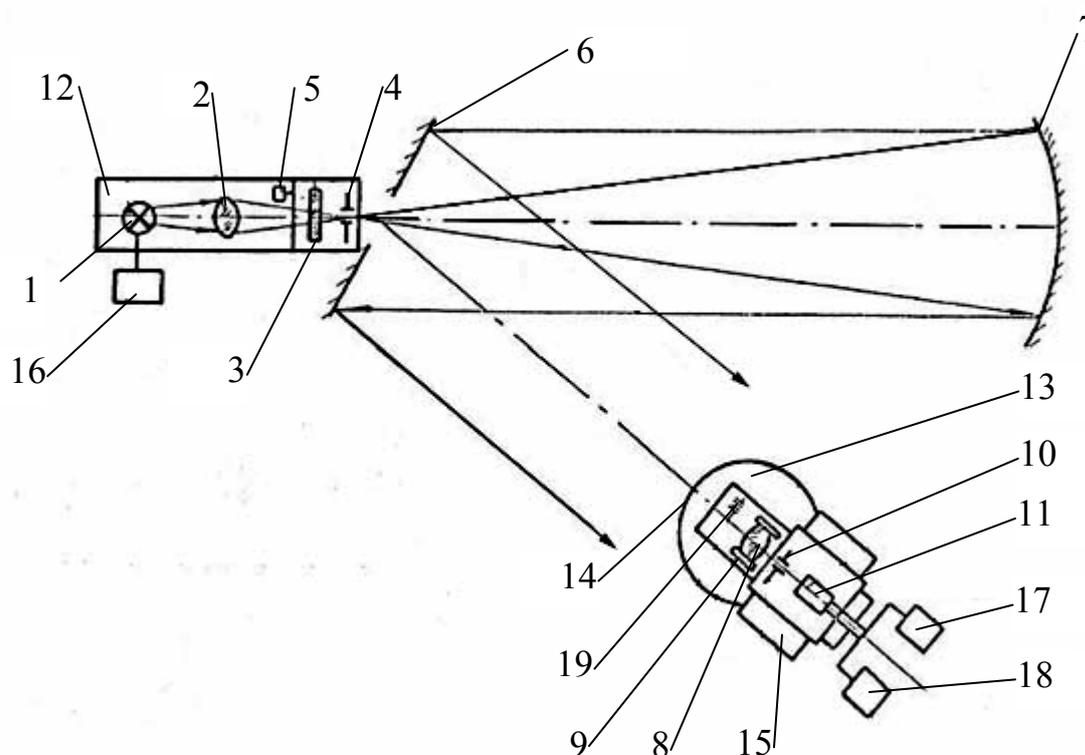


Рис. 56

1 – источник излучения, 2 – конденсор, 3 – фильтр, 4 – коллиматорная диафрагма, 5 – модулятор света, 6 – плоское зеркало, 7 – коллиматорный объектив, 8 – испытуемый объектив (линзовый, зеркально-линзовый, зеркальный), 9 – объективодержатель, 10 – измерительная диафрагма, 11 – фотоприемник, 12 – поперечные направляющие коллиматорной диафрагмы, 13 – поворотный рычаг, 14 – угломерное устройство, 15 – трехкоординатное устройство, 16 – блок питания источника излучения, 17 – блок питания фотоприемника, 18 – регистрирующая аппаратура, 19 – узел двойной коллиматорной диафрагмы.

Указанная установка снабжена поворотным устройством с рычагом 13, позволяющим разворачивать объектив относительно пучка, выходящего из коллиматора. В повернутом положении можно анализировать изображение неосевой точки. Одна из основных трудностей при измерениях состоит в необходимости с помощью трехкоординатного устройства 15 установить измерительную диафрагму 10 и связанный с ней фотоприемник так, чтобы центр диафрагмы совпадал с энергетическим центром точечного изображения, сфокусированного в плоскости диафрагмы. При смене диафрагмы центр каждой новой диафрагмы должен попадать в ту же точку.

Результирующая погрешность измерений во многом зависит от точности установки диафрагм.

В данной работе для первичных измерений и построения функции концентрации энергии в составе измерительной установки используется матричный ПЗС. Сама установка и методика измерений не требуют выполнения трудоемких юстировочных операций.

Предложенная схема коллиматорной установки с матричным ПЗС для оценки качества объективов приведена на рис. 57.

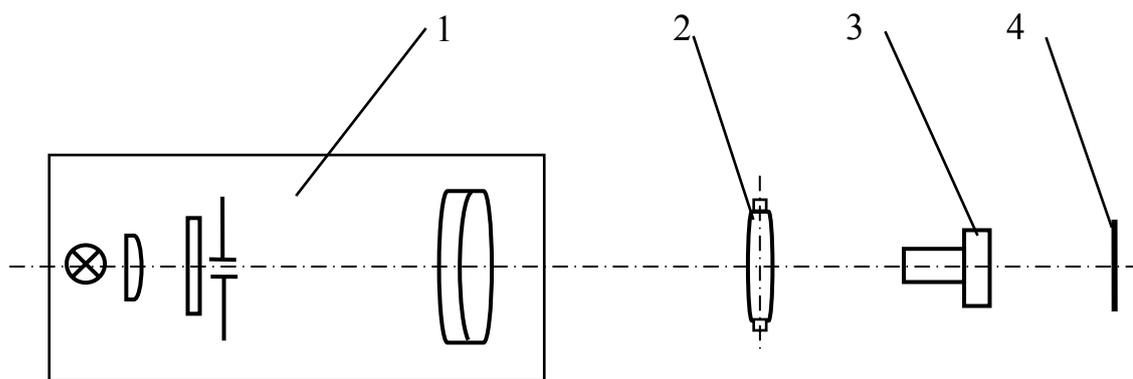


Рис. 57. Коллиматорная установка с матричным ПЗС для контроля качества объективов:

1 – коллиматор, 2 – испытуемый объектив, 3 – микрообъектив, 4 – матрица ПЗС.

В передней фокальной плоскости объектива коллиматора помещается точечный источник света. Точечный источник составлен из круглой диафрагмы малого диаметра, которая через конденсор освещается лампой накаливания. В зависимости от выбранной для измерений спектральной области между источником света и диафрагмой может быть установлен светофильтр. Испытуемый объектив строит изображение точечного источника в своей задней фокальной плоскости. Размер изображения характеризует качество объектива. Требования к качеству объектива указывают как диаметр пятна, в котором должен находиться определенная доля от общей энергии во всем изображении.

Качество современных объективов таково, что размер построенного им изображения точечного источника сопоставим с размером элемента ПЗС структуры. Для удобства анализа такого изображения в состав измерительной установки введен микрообъектив. Микрообъектив переносит изображение точки с определенным увеличением в плоскость анализа, куда устанавливается матрица ПЗС.

Юстировка установки сводится к фокусировке изображения на матрице ПЗС путем ее перемещения вдоль оптической оси и проверке увеличения микрообъектива с помощью тест - объекта.

Обработка измерительной информации, снимаемой с матрицы ПЗС, сводится к определению в изображении доли энергии, которая попадает в окружности разного диаметра. Первоначально информация с камеры записывается как bmp-файл произвольного размера, запись производится с камеры, в которой отключена γ - коррекция.

Обработка измерительной информации содержит следующие основные этапы:

- запись одного кадра изображения в виде bmp-файла;
- выделение рабочего фрагмента с изображением точки;
- определение среднего темнового уровня сигнала по неосвещенному участку матрицы;
- пороговая обработка сигнала по среднему темновому уровню;
- вычисление координат энергетического центра изображения;
- вычисление энергии, попадающей в окружность заданного радиуса как доли от общей энергии изображения точки.

Пороговая обработка сигнала сводится к обнулению величин сигналов в элементах с уровнем сигнала менее среднего темнового значения и вычитанию среднего темнового значения из уровней сигналов остальных элементов.

Вычисления координат энергетического центра изображения производятся по известным формулам,

$$x_c = \frac{\sum_i \sum_j U_{i,j} \cdot j}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}, \quad y_c = \frac{\sum_i \sum_j U_{i,j} \cdot i}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}$$

где $U_{i,j}$ – уровень сигнала в элементе матрицы с номером (i,j) .

Вычисление энергии, попадающей в окружность заданного радиуса, вычисляется как сумма сигналов со всех элементов, для координат которых выполняется условие:

$$R^2 > (x_j - X_c)^2 + (y_i - Y_c)^2,$$

где x_j и y_i координаты элементов с номерами j и i соответственно, R – заданный радиус окружности.

Программа для указанной обработки сигналов реализована в среде Mathcad. Сама программа установлена на персональный компьютер, задействованный в лабораторной работе, и используется при обработке первичной измерительной информации.

В состав измерительной установки входит коллиматор с фокусным расстоянием $f=600$ мм, в качестве испытуемого объектива используется фотографический объектив «Гелиос-44». Регистрация изображения производится с помощью ПЗС камеры PC Vision-3, сопряженной с персональным компьютером.

Порядок выполнения работы

Выполнение работы происходит в два этапа. На первом этапе должны быть получены и записаны в память персонального компьютера изображения, характеризующие качество испытуемого объектива. На втором этапе выполняется программная обработка изображений и построение графиков изменения энергии в изображении в зависимости от диаметра окружности, ограничивающей долю энергии от общей энергии изображения.

Получение и запись изображений, характеризующих качество испытуемого объектива, производится в следующей последовательности.

1. Включить персональный компьютер, входящий в состав измерительной установки.

2. Включить блок питания телевизионной камеры.

3. Включить блок питания источника света коллиматора.

4. На рабочем столе монитора компьютера найти ярлык «PC Vision 3» для работы с ПЗС камерой, сопряженной с компьютером; запустить программу работы с камерой.

5. На появившейся панели инструментов работы с камерой нажать кнопку «Start», в окне, показывающем изображение с камеры, должно появиться анализируемое изображение, подобное показанному на рис. 58. Для камеры должны быть выбраны следующие установки режима работы:

- Размер изображения - 497×290 ,

- «Exposure» – в режиме «auto»,

- «Gain» – в режиме «auto»,

- «Brightness» – в среднем положении,

- «Contrast» – в среднем положении.

6. Наблюдая изображение на мониторе, подвижкой камеры с микрообъективом вдоль оптической оси добиться визуально наиболее резкого изображения.

7. На панели инструментов нажать кнопку «Stop».

8. Нажать кнопку «сохранить» (кнопка с изображением дискеты), по пути D:\lab13\image1\ сохранить зафиксированное изображение. В качестве

типа файла для сохранения должен быть указан bitmap file (*.bmp). Если изображение под таким именем уже было сохранено ранее, то будет задан вопрос «заменить?», на который надо ответить «да».

9. Повторно нажать кнопку «Start», подвижкой камеры с микрообъективом вдоль оптической оси выполнить расфокусировку изображения, при которой видимый размер изображения "точки" увеличится примерно на треть.

10. Нажать кнопку «Stop», нажать кнопку «сохранить», по пути D:\lab13\image2\ сохранить расфокусированное изображение.

Программная обработка изображений и построение графиков

1. На рабочем столе монитора компьютера найти ярлык «L13 image processing» и запустить программу обработки изображения (программа также может быть открыта по пути D:\Lab13\L13 image processing\). При вызове указанной программы автоматически запустится «Mathcad 2001», в котором откроется указанная программа.

2. Первый выполняемый оператор программы считывает изображение «image1» в массив a1. Оператор должен иметь вид `a1=READ_RED(«d:\lab13\image1.bmp»)`.

3. С помощью линейки прокрутки просмотреть этапы выполнения программы, которые иллюстрируются рисунками 58, 59, 60:

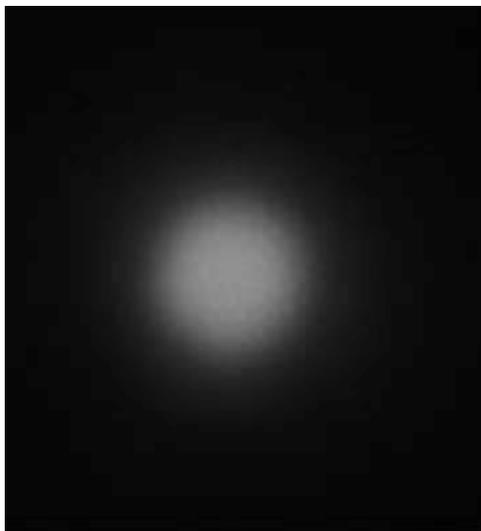


Рис. 58. Выделенный для обработки фрагмент записанного изображения точки

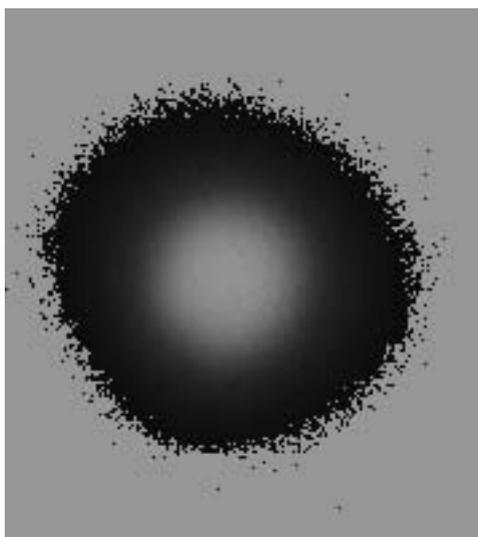


Рис. 59. Изображение точки после вычитания среднего темного уровня сигнала с ПЗС матрицы

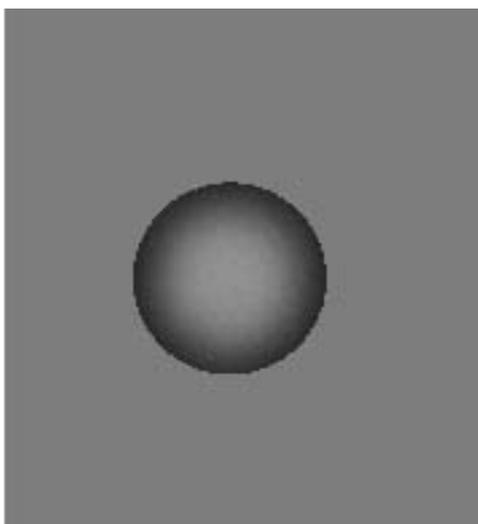


Рис. 60. Изображение точки, ограниченное окружностью заданного радиуса

4. Просматривая программу, дойти до комментария «R - радиус окружности в элементах, внутри которого суммируются сигналы», в строке $R = xx$, где xx – радиус окружности в элементах матрицы, задать значение R заведомо большим, чтобы внутри окружности с этим радиусом находились все элементы с ненулевой освещенностью. Значение задается вводом с клавиатуры компьютера. Для облегчения выбора R можно пользоваться изображением точки после вычитания среднего темного уровня сигнала с ПЗС матрицы. Это изображение формируется в ходе выполнения программы и отображается справа от текста выполняемых операторов. Выделив это изображение можно просмотреть координаты отдельных элементов и выбрать значение R.

5. Программа автоматически вычислит величину E_c – суммарную величину сигналов со всех элементов матрицы внутри заданного радиуса. Эта величина соответствует суммарной энергии в полном изображении.

6. Полученное значение суммарной энергии следует присвоить переменной E_m - суммарной энергии в полном изображении, введя значение с клавиатуры компьютера.

7. Уменьшить значение R . Программа автоматически вычислит величину $E = \frac{E_c}{E_m}$, которая характеризует долю энергии от суммарной величины, находящуюся внутри окружности заданного радиуса.

8. Повторить вычисления для ряда уменьшающихся значений R и получить соответствующие им значения E . Набор этих значений даст функцию концентрации энергии в изображении, как $E=f(R)$.

9. Построить график функции $E=f(R)$.

10. Для расфокусированного изображения (величину расфокусировки задает преподаватель) повторить измерения и обработку изображения. Следует повторить пункты выполнения работы, начиная с п.7 записи изображения и все пункты (1-9) по обработке изображения.

11. Сравнить графики функции $E=f(R)$ для сфокусированного и расфокусированного изображений.

Содержание отчета

1. Схема измерительной установки с указанием плоскости, в которой испытуемый объектив строит изображение точки.

2. Основные расчетные формулы для определения координат энергетического центра изображения и вычисления энергии, содержащейся внутри окружности определенного радиуса.

3. Рисунки изображений, по которым вычисляются функции концентрации энергии.

4. Экспериментально полученные графики функций концентрации энергии для испытуемого объектива.

5. Выводы о качестве испытуемого объектива.

Контрольные вопросы

1. Назовите известные критерии для оценки качества фотографических объективов.

2. В чем заключаются трудности измерения концентрации энергии в изображении с использованием сменных диафрагм?

3. Каково назначение микрообъектива, используемого в схеме измерительной установки?

4. Перечислите факторы, влияющие на ход измеренных функций концентрации энергии.

Литература

1. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., 1990, 224 с.
2. ОСТ 3-6816-94. Метод измерения функции концентрации энергии
3. ГОСТ 26086-84. Межгосударственный стандарт. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения. Издательство стандартов, Москва.
4. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М., Машиностроение, 1987., 264 с