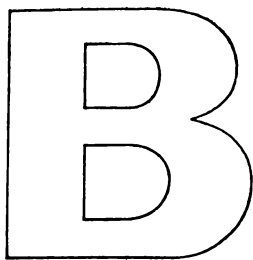




ДЛЯ ВУЗОВ

*Г.В. Креопалова
Н.Л. Лазарева
Д.Т. Пуряев*

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ



ДЛЯ ВУЗОВ

*Г.В.Креопалова
Н.Л.Лазарева
Д.Т.Пуряев*

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Под редакцией проф. Д. Т. Пуряева

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве
учебника для оптических специальностей вузов*



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1987

ББК 34.9
К79
УДК 535.8 (075.8)

Рецензент д-р техн. наук проф. Г. В. Погарев,
кафедра «Прикладная оптика» МИИГАиК
(зав. кафедрой д-р техн. наук проф. А. С. Дубовик)

Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т.

К79 Оптические измерения: Учебник для вузов по специальностям «Оптико-электронные приборы» и «Технология оптического приборостроения»/Под общ. ред. Д. Т. Пуряева. — М.: Машиностроение, 1987. — 264 с.: ил.

(В пер.): 90 к.

Изложены основы оптических измерений. Рассмотрены методы и приборы для измерения показателей преломления и дисперсии оптических материалов, формы оптических поверхностей, конструктивных параметров оптических деталей, основных характеристик оптических приборов и оценки качества создаваемого ими изображения. Даны сведения об оптико-электронных методах и приборах для автоматизации измерений, лазерных и фотоэлектрических интерферометрах, современных критериях качества оптического изображения, о контроле качества астрономической оптики.

К $\frac{2706000000-070}{038 (01)-87}$ 70-87

ББК 34.9

УЧЕБНИК

*Галина Васильевна Креопалова, Наталья Леонидовна Лазарева,
Даниил Трофимович Пуряев*

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Редактор *З. С. Баранова*
Художественный редактор *С. С. Водичиц*
Технический редактор *Н. В. Тимофеевко*
Корректоры *Л. Л. Георгиевская* и *А. М. Усачева*

ИБ № 4230



Сдано в набор 26.12.86. Подписано в печать 07.08.87. Т-09545. Формат 60×90^{1/16}. Бумага кн.-журнальная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,5. Усл. кр.-отт. 16,5. Уч.-изд. л. 17,98. Тираж 8400 экз. Заказ 2956. Цена 90 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромовский пер., 4

Отпечатано по офсету с набора Ленинградской типографии № 6 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10 в Ленинградской типографии № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

© Издательство «Машиностроение», 1987

Современные оптические приборы играют важную роль в народном хозяйстве нашей страны, служат основой научно-технического прогресса. Постоянно повышаются требования к качеству оптических приборов, расширяются области их применения, создаются принципиально новые типы оптических систем и приборов. Научной базой для управления технологическим процессом создания любого оптического прибора служит теория оптических измерений. Цель учебника заключается в изложении теоретических основ и методов измерения параметров оптических приборов и их характеристик как в процессе изготовления приборов, так и на заключительной стадии их окончательной сдачи в эксплуатацию. Изучение оптических измерений как технической науки предполагает у читателя знание основ физической оптики и теории оптических систем. В учебных планах вузов эти дисциплины обычно предшествуют дисциплине «Оптические измерения». Методическая особенность учебника заключается в приоритетном изложении сущности и научной идеи изучаемого метода измерения; процедуре и технике измерения уделено меньше внимания. Исключение составляют лишь те методы, сущность которых раскрывается в самой процедуре измерения.

Учебной литературы по дисциплине «Оптические измерения» крайне мало. Первое учебное пособие «Оптические измерения» было издано в нашей стране в 1937 г. С. С. Тяжеловым. Характерной особенностью пособия является фундаментальная теоретическая база, на которой построено изложение основных методов измерения констант оптических систем. Учебное пособие С. С. Тяжелова, естественно, не соответствует новым учебным программам и давно стало библиографической редкостью. Однако многие методы измерений, описанные С. С. Тяжеловым, не утратили методической ценности и реализуются с помощью современных оптических приборов.

В Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) крупным ученым проф. А. Н. Захарьевским была создана учебная дисциплина «Оптические измерения». В 1946 г. в ЛИТМО было выпущено стеклографическое издание конспекта лекций проф. А. Н. Захарьевского под названием «Контроль оптических систем и приборов». В 1962—1963 гг. в ЛИТМО под редакцией проф. А. Н. Захарьевского было издано «Руководство

к лабораторным работам по курсу «Оптические измерения», составленное проф. Г. В. Погаревым. В настоящее время в библиотеках сохранились лишь единичные экземпляры этих внутри-вузовских изданий, поэтому они практически недоступны студентам.

Важно заметить, что авторами большинства рассмотренных в учебной литературе методов измерений были крупные ученые, например, Э. Аббе, И. Гартман, В. П. Линник, А. А. Майкельсон, Д. Д. Максutow, И. В. Обреимов, Х. Л. Физо, Л. Ж. Б. Фуко, Ж. Фраунгофер и др. Работы других авторов отличаются одна от другой лишь методическими особенностями изложения известных методов измерения, за исключением тех работ, которые созданы авторами учебной литературы на основании собственных исследований.

Проф. В. А. Афанасьевым были написаны в 1961 г. учебное пособие и в 1968 и в 1981 гг. — учебники под названием «Оптические измерения». Их автор — крупный специалист в области оптических измерений, опытный педагог, сочетавший глубокое знание теоретических основ с большим практическим опытом.

С. С. Тяжелов, А. Н. Захарьевский, В. А. Афанасьев и Г. В. Погарев систематизировали научные знания в области оптических измерений. Их труды имеют не только научное, но и методическое значение. По мере возможности авторы использовали их опыт написания учебно-методической литературы.

Главное отличие настоящего издания от предшествующих заключается в том, что оно написано в соответствии с новыми учебными программами и содержит описание не только классических, но и современных методов оптических измерений. При этом авторы исходили из того, что в век научно-технической революции происходит сравнительно быстрое моральное старение приборов и процедуры измерений, однако научная идея, заложенная в тот или иной метод измерений, живет гораздо дольше. В этих случаях главное внимание уделено сущности измерений и показаны возможные варианты технической реализации научной идеи.

Д. Т. Пуряевым написаны предисловие, введение, пп. 1—3 в гл. 1; гл. 2 и 4; п. 2 в гл. 6; предметный указатель; Г. В. Креопаловой — гл. 5 и 6 (кроме п. 2); Н. Л. Лазаревой — пп. 2 и 3 в гл. 1; гл. 3.

Наглядность получаемой информации является одним из наиболее ценных свойств многих оптических приборов. Невозможно представить себе работу космонавта, изучающего природные ресурсы Земли, или работу хирурга, сшивающего тончайшие кровеносные сосуды, без применения оптических приборов. Многие величайшие научные открытия были сделаны с помощью измерительных оптических приборов. Примером тому может служить знаменитый «опыт Майкельсона», в котором с помощью изобретенного Майкельсоном интерферометра было установлено, что движение Земли не влияет на скорость распространения света. Этот результат навсегда останется в истории науки как замечательное достижение, потому что он стал экспериментальной основой тех принципов, на которых Эйнштейн создал теорию относительности.

Создание оптического прибора невозможно без измерения и контроля его параметров как в процессе производства, так и после окончательной сборки. Современный оптический прибор содержит, как правило, кроме оптических деталей (линзы, призмы, зеркала, оптические клинья, плоскопараллельные пластинки и др.), механические детали (оправы оптических деталей, корпус прибора, приводные механизмы и др.). Поэтому в процессе производства оптического прибора возникает необходимость в измерении и контроле как отдельных конструктивных параметров оптических деталей и узлов, так и оптического прибора в целом. Например, прежде чем изготавливать линзу, входящую в фотографический объектив, надо измерить показатель преломления и дисперсию оптического стекла, из которого она должна быть изготовлена, а также проверить характеристики качества стекла (оптическую однородность, двойное лучепреломление, светопоглощение, бессвильность, пузырность). В дальнейшем потребуются измерять или контролировать толщину линзы, радиусы ее поверхностей и их качество, центрировку и правильность расположения линзы в объективе. Наконец, необходимо проверить фокусное расстояние, угловое поле, относительное отверстие и качество полностью собранного объектива. Таким образом, активное и успешное управление технологическим процессом изготовления оптического прибора невозможно без измерения параметров оптических деталей и всего прибора в целом. Вот почему оптические

измерения являются неотъемлемой и важнейшей частью большинства технологических процессов оптико-механической промышленности.

Однако оптические измерения находят не только прикладное, но и самостоятельное научное применение, не связанное непосредственно с изготовлением оптических приборов. Например, рефрактометрические методы исследования свойств жидкостей и газов широко распространены в самых различных областях химии. Интерференционные методы измерения диаметров звезд находят применение в астрономии. Широко используются оптические измерения для исследования физических характеристик лазерного излучения. Изучение свойств кристаллов невозможно без использования оптических методов измерения их показателей преломления и дисперсии.

Оптические измерения — техническая наука, основным содержанием которой является измерение и контроль конструктивных параметров оптических элементов и систем, а также измерение физических характеристик изучаемых объектов с помощью оптических методов и оптических приборов. Измерение параметров оптико-электронных приборов и применение электроники в процессах измерения в настоящее время являются обычными явлениями. Главная особенность оптических измерений заключается в том, что они имеют, как правило, высокую точность и наглядность, позволяя наблюдателю «видеть» погрешности измеряемого или контролируемого объекта. Например, при исследовании формы отражающей поверхности астрономического зеркала интерференционным методом можно не только обнаружить погрешности поверхности, но и измерить их значение с точностью до сотых долей микрометра по искривлению интерференционных полос.

Наука об оптических измерениях имеет много достижений, о которых речь пойдет ниже, но и в ней существует много нерешенных проблем. Приведем некоторые из них.

В длиннофокусных фотографических объективах используются линзы диаметром 500 ... 600 мм, содержащие выпуклые сферические поверхности. Необходимо разработать высокоточные и производительные методы и приборы для контроля оптической однородности заготовок стекла диаметром 500 ... 600 мм и формы выпуклых сферических поверхностей линз в процессе их изготовления.

Изготовление и контроль асферических поверхностей линз и зеркал, особенно больших диаметров, является трудоемким процессом. Необходимо разработать методы активного контроля формы асферических поверхностей и передать результаты контроля в ЭВМ в целях последующей автоматической корректировки технологического процесса до получения поверхности нужной формы, т. е. осуществить замкнутый технологический цикл по схеме: станок — измерительный прибор — ЭВМ — станок. Авто-

матизация оптических измерений и процессов контроля является важнейшей проблемой оптического приборостроения.

Необходимо существенно повысить точность измерения показателя преломления и дисперсии оптического стекла, используемого для изготовления линз большого диаметра (свыше 400 мм).

Список нерешенных проблем значительно длиннее списка достижений, поэтому ограничимся приведенными примерами. Очевидно, что решение актуальных задач оптических измерений лишь путем повышения точности существующих методов измерений невозможно. Необходимо искать принципиально новые решения на основе современных научных достижений, повышать экономичность измерений путем их автоматизации.

Велика роль советских ученых в создании науки об оптических измерениях. Основы ее заложили академики С. И. Вавилов, Д. С. Рождественский, А. А. Лебедев, В. П. Линник, И. В. Обреимов, чл.-корр. Д. Д. Максutow. Их труды в области оптических измерений получили признание как в нашей стране, так и за рубежом. Например, двойной микроскоп и микроинтерферометр В. П. Линника, изобретенные им в тридцатых годах нашего столетия, до сих пор серийно выпускаются и успешно используются в нашей промышленности и за рубежом.

Метод И. В. Обреимова для измерения малых разностей показателей преломления широко применяется в технологическом процессе варки оптического стекла как экспрессный метод. Теневой метод, используемый для контроля качества астрономических зеркал, был успешно развит и дополнен Д. Д. Максutowым.

В области интерференционных измерений широко известны научные труды М. Ф. Романовой, А. Н. Захарьевского, Ю. В. Коломийцова, И. М. Нагибиной, И. В. Скокова, И. И. Духопела и др. Оригинальные методы и приборы для контроля формы асферических поверхностей разработаны М. М. Русиновым, Б. А. Чуниным и др. Научные труды Г. В. Погарева внесли большой вклад в науку об юстировке оптических приборов.

Создание в нашей стране крупнейшего в мире большого азимутального телескопа (БТА) с главным зеркалом диаметром 6 м потребовало разработки новых и усовершенствования существующих методов и приборов для контроля формы астрономических зеркал. Некоторые из них описаны ниже. Существенный вклад в теорию и практику применения метода Гартмана внесли научные труды Э. А. Витриченко, В. А. Зверева, Л. И. Снежко.

1. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Целью измерения является определение числового значения какой-либо величины. Результат измерений всегда является приближенным, так как установить истинное значение измеряемой величины практически невозможно. Согласно ГОСТ 16263—70 *погрешностью измерения* называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Различают погрешности случайные, систематические и грубые.

Случайными называются погрешности, величина и знак которых заранее неизвестны. Они потому и называются случайными, что отличаются друг от друга в отдельных измерениях и эти различия имеют случайную, неизвестную нам величину. Правила определения случайных погрешностей изучаются в теории ошибок — математической науке, основанной на законах теории вероятностей.

Систематическими называются погрешности, значения которых одинаковы во всех измерениях, производимых одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов при неизменных внешних условиях. При повторных измерениях систематические погрешности не меняют свой знак и величину. Источниками систематических ошибок являются чаще всего конструктивные недостатки измерительных приборов (криволинейность направляющих, неправильная установка прибора, неточная градуировка шкал, остаточные аберрации оптической системы прибора и др.), поэтому их называют иногда *инструментальными* или *приборными*. Систематические погрешности, происхождение которых нам известно, а значение может быть определено достаточно точно, учитываются при обработке результатов измерений путем введения соответствующих поправок.

Выясним некоторые связи между случайными и систематическими погрешностями. Для уменьшения случайной погрешности следует выполнить не одно, а ряд измерений, при этом случайная погрешность тем меньше, чем больше число измерений. Однако нет смысла выполнять измерений больше, чем это необходимо. Вопрос о целесообразности выполнения одного или нескольких измерений решается с помощью следующих правил.

1. Если систематическая погрешность является определяющей, т. е. ее значение существенно больше значения случайной погреш-

ности, присущей рассматриваемому методу, то достаточно выполнить измерение один раз.

2. Если случайная погрешность является определяющей, то измерение следует производить несколько раз. Число измерений целесообразно выбирать таким, чтобы случайная погрешность среднего арифметического была меньше систематической ошибки.

Грубыми погрешностями (промахами) называются такие погрешности, которые резко превышают допустимые значения и явно искажают результаты измерений. Источником грубых ошибок может быть невнимательность экспериментатора, резко и временно изменившиеся внешние условия измерений, внезапная разъюстировка прибора и т. п. Грубые погрешности выявляют при повторных измерениях и обязательно исключают из результатов измерений.

В практике измерений различают также *абсолютные* и *относительные погрешности*. Погрешности, выраженные в единицах измеряемой величины, называются абсолютными погрешностями. Погрешности, выраженные в долях числовых значений измеряемых величин, называются относительными погрешностями и чаще всего выражаются в процентах.

Рассмотрим методику обработки результатов измерений, обусловленных только случайными погрешностями. Пусть получено n значений измеряемой величины: $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$. Наиболее достоверным значением измеряемой величины является *среднее арифметическое*

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} a_i. \quad (1)$$

Остаточными погрешностями называются разности: $\rho_1 = a_1 - a_{\text{ср}}, \rho_2 = a_2 - a_{\text{ср}}, \dots, \rho_i = a_i - a_{\text{ср}}, \dots, \rho_n = a_n - a_{\text{ср}}$. Сумма остаточных погрешностей всегда равна нулю.

Точность измерений характеризуется так называемой средней квадратической погрешностью σ или, чаще всего, вероятной погрешностью ϵ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i^2}{n-1}}, \quad \epsilon = \frac{2}{3} \sigma. \quad (2)$$

Величины σ и ϵ характеризуют точность метода, а не точность результата измерений. При увеличении числа измерений n численные значения σ и ϵ существенно не изменяются, а лишь уточняются. Для характеристики точности результата измерений служат *средняя квадратическая погрешность* результата

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

Т а б л и ц а 1 и вероятная погрешность результата

Обработка результатов измерения фокусного расстояния объектива

| Номер измерения | f' , мм | ρ_i , мм | ρ_i^2 , мм ² |
|---|-----------|---------------|------------------------------|
| 1 | 100,02 | 0,02 | 0,0004 |
| 2 | 100,04 | 0,04 | 0,0016 |
| 3 | 100,00 | 0 | 0 |
| 4 | 99,98 | -0,02 | 0,0004 |
| 5 | 99,96 | -0,04 | 0,0016 |
| $f'_{\text{ср}} = 100,00 \quad \sum \rho_i = 0 \quad \sum \rho_i^2 = 0,004$ | | | |

$$E =$$

$$= \frac{2}{3} S = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) следует, что для уменьшения значений S и E следует увеличивать число измерений n . Однако этот прием невыгоден с практической точки зрения, так как он резко увеличивает трудоемкость измерений. Например, как следует из формулы (3), для уменьшения значения S

в 2 раза необходимо число измерений n увеличить в 4 раза. Поэтому для повышения точности измерений применяют более точный метод, чтобы уменьшить тем самым значения σ и ϵ .

Максимально возможные погрешности ряда измерений и его результата характеризуются соответственно величинами 3σ и $3S$. Смысл этих величин заключается в том, что ни одно из частных значений ряда измерений не отличается от истинного значения более чем на 3σ . Вероятность выхода за эти пределы ничтожно мала.

Пример. При пятикратном измерении фокусного расстояния f' объектива были получены пять значений f' , вычислены остаточные погрешности ρ_i и их квадраты ρ_i^2 (табл. 1).

Используя формулы (1)–(4), найдем $\sigma = 0,0316$ мм, $\epsilon = 0,021$ мм, $S = 0,014$ мм, $E = 0,01$ мм. Окончательный результат: $f' = 100 \pm 0,01$ мм.

Косвенными называются такие измерения, когда измеряется не непосредственно интересующая нас величина (прямые измерения), а другие величины, связанные с ней функциональной зависимостью. Например, для измерения радиусов сферических поверхностей методом колец Ньютона надо измерить диаметры интерференционных колец и длину волны света, а затем по известной формуле вычислить радиус поверхности. При измерении дисперсии оптических стекол необходимо измерить показатель преломления для различных длин волн, а затем вычислить дисперсию как разность показателей преломления.

Пусть интересующая нас величина M функционально связана с непосредственно измеряемыми величинами x, y, \dots, z :

$$M = f(x, y, \dots, z). \quad (5)$$

Полный дифференциал этой функции

$$dM = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \dots + \frac{\partial f}{\partial z} dz, \quad (6)$$

а средняя квадратическая погрешность величины M

$$\sigma_M = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2}, \quad (7)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \sigma_z$ — соответственно средние квадратические погрешности непосредственно измеренных величин x, y, \dots, z .

Рассмотрим частные, но наиболее важные в практическом отношении случаи.

Пусть $M = x + y + z$. Тогда

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива для любого числа слагаемых, составляющих величину M .

Пусть $M = xyz$. Логарифмируя функцию M , а затем дифференцируя полученное выражение, найдем

$$\ln M = \ln x + \ln y + \ln z, \quad \frac{dM}{M} = \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y} + \frac{dz}{z},$$
$$\sigma_M = M \sqrt{(\sigma_x/x)^2 + (\sigma_y/y)^2 + (\sigma_z/z)^2}. \quad (9)$$

Формула (9) справедлива для любого числа сомножителей, определяющих величину M .

2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ НАВОДОК

При выполнении измерений визуальным способом часто используют зрительные трубы, микроскопы или лупы. В плоскости действительного промежуточного изображения зрительной трубы или микроскопа обычно устанавливают пластину с перекрестием, шкалой, сеткой, измерительной маркой и другими измерительными элементами. Используя зрительную трубу или микроскоп в роли отсчетного устройства, наблюдатель должен совместить изображение какого-либо элемента объекта измерения с центром перекрестия или серединой штриха измерительной шкалы, расположенной в плоскости действительного изображения. Для этого измерительный прибор или объект измерения смещают один относительно другого в поперечном направлении, т. е. перпендикулярно к оптической оси, пока изображение объекта измерения не совместится, например, с центром перекрестия микроскопа или трубы. Такая измерительная операция называется *поперечной наводкой*. Если объект измерений или измерительный прибор смещают один относительно другого в продольном направлении (вдоль оптической оси) до совмещения

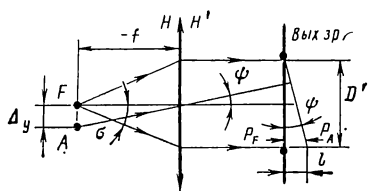


Рис. 1. Ход лучей при поперечной наводке

между изображением объекта измерения и измерительной маркой (центром перекрестия, краем светлого и темного полей, серединой отсчетного штриха), при котором наблюдатель уверенно устанавливает факт их несовмещения. Чувствительность продольной наводки обычно выражается в линейной мере, а поперечной — как в угловой, так и в линейной мерах. Чувствительность наводок при отсутствии aberrаций измерительного прибора зависит главным образом от дифракционных явлений, неизбежных в оптических приборах, и от физиологических свойств глаза.

Опытным путем установлено, что наилучшие условия для производства измерений с помощью зрительных труб и микроскопов обеспечены, если диаметр D' выходного зрачка трубы или микроскопа лежит в пределах 0,5 ... 2 мм, освещенность объекта измерения и отсчетных шкал — в пределах 50 ... 250 лк, контраст изображения объекта в поле зрения достаточно высок и наблюдатель имеет нормальное зрение. В этих условиях человеческий глаз обладает поразительно высокой чувствительностью к взаимному смещению сравниваемых волновых фронтов, попадающих в зрачок глаза наблюдателя. Например, при совмещении штрихов, между которыми находится линия раздела, и освещении измерительного поля излучением с длиной волны 0,5 мкм при диаметре D' выходного зрачка измерительного прибора, равном 2 мм, наблюдатель способен зафиксировать взаимное смещение сравниваемых волновых фронтов на 0,1 мкм. Именно эта величина, сохраняющая приблизительно постоянное значение при $D' \leq 2$ мм, положена А. Н. Захарьевским в основу вывода формул, определяющих чувствительность наводок в наиболее важных практических случаях, рассматриваемых ниже.

Поперечная наводка точнее продольной. Пусть HH' — главные плоскости (рис. 1) лупы, микроскопа или окуляра зрительной трубы, в передней фокальной плоскости которого расположены штрихи F и A , направленные перпендикулярно к плоскости рисунка. В зрительных трубах и отсчетных микроскопах в передней фокальной плоскости окуляра часто располагается тонкая плоскопараллельная пластинка с сеткой, шкалой или перекрестием, поэтому можно представить себе, что точка F — след штриха, расположенного в плоскости пластинки, а точка A — след штриха, действительное изображение которого создано

изображения объекта измерения с центром перекрестия (или отсчетной шкалой), то такая измерительная операция называется *продольной наводкой*, или *фокусировкой*.

Чувствительность наводки.

Чувствительностью продольной или поперечной наводки называется наименьшее расстояние

предшествующей частью оптической системы, например объективом зрительной трубы или микроскопа.

Целью поперечной наводки является такое совмещение штрихов, при котором штрихи располагаются на одной линии (рис. 2, а). Перемещая один из штрихов относительно другого, например, с помощью механизма наклона зрительной трубы или винтового окулярного микрометра, наблюдатель прекратит свои действия, когда, по его мнению, один из штрихов будет служить продолжением другого. В этом случае в глаз наблюдателя поступают волновые фронты P_F и P_A соответственно от штрихов F и A , причем линейное отклонение l между ними на краю выходного зрачка в предельном случае составляет 0,1 мкм.

Дальнейшее сближение штрихов наблюдатель осуществить не способен, так как это выше физиологических возможностей человеческого глаза. Полагая $D' = 2$ мм, $l = 0,1$ мкм, найдем чувствительность поперечной наводки $\psi = 5 \cdot 10^{-5} = 10''$. Соответствующее ей линейное значение Δ_y может быть найдено из рис. 1: $\Delta_y = -f\psi = f'\psi$, где f и f' — соответственно переднее и заднее фокусные расстояния рассматриваемой системы. Так как $f' = D'/(2\sigma)$, где σ — передний апертурный угол, то $\Delta_y = \psi D'/(2\sigma)$. Положив, как и прежде, $D' = 2$ мм, $\psi = 5 \cdot 10^{-5}$, получим $\Delta_y = 0,05/\sigma$, где Δ_y выражена в мкм. Итак, чувствительность поперечной наводки в угловой мере равна $10''$, а в линейной мере вычисляется по формуле А. Н. Захарьевского:

$$\Delta_y = a/\sigma, \quad (10)$$

где $a = 0,05$ мкм.

Суть рассуждений не меняется и в том случае, если изображение предмета, построенное окуляром или микроскопом, расположено от глаза наблюдателя на расстоянии наилучшего видения (250 мм для нормального глаза).

Необходимо помнить, что за исходное положение для вывода формул было принято следующее: человеческий глаз способен реагировать на смещение сравниваемых волновых фронтов, равное 0,1 мкм. Однако это значение, естественно, является приближенным и, главное, зависящим не только от индивидуальных свойств глаза, но и от вида марки и условий наблюдений.

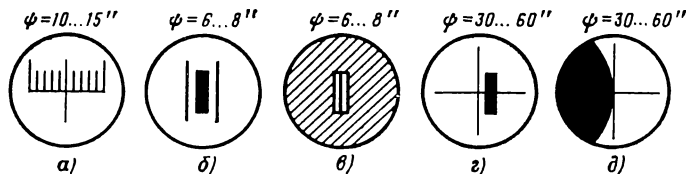


Рис. 2. Характерные виды поля изображения при совмещении:

а — двух тонких штрихов (нионусная установка); б — штриха и биссектора (биссекторная установка); в — штриха и щели (биссекторная установка); г — тонкого штриха или перекрестия с краем толстого штриха; д — тонкого штриха или перекрестия с краем темного поля

Наивысшая чувствительность достигается в случае биссекторной установки, при которой штрих располагается симметрично между двумя штрихами биссектора или краями светлой щели, расположенной на темном фоне (рис. 2, б, в). При совмещении края толстого штриха или края темного поля с центром перекрестия (рис. 2, г, д) чувствительность поперечной наводки значительно снижается.

Разрешающая способность нормального глаза, как известно, равна $50 \dots 60''$. Тот факт, что чувствительность поперечной наводки оказывается в $5 \dots 6$ раз выше разрешающей способности глаза, нередко вызывает недоумение. Однако следует помнить, что понятие о разрешающей способности глаза справедливо для двух точечных изображений, построенных оптической системой глаза на его сетчатке. Разрешающая способность глаза для распознавания точечных источников света, обусловленная главным образом диаметром колбочек сетчатки глаза, равна в угловой мере $50 \dots 60''$. На желтом пятне, которое одно лишь и имеет значение для измерительных операций, находятся только колбочки, причем их центры лежат на вертикальных прямых на равных расстояниях, а в горизонтальном направлении центры соседних колбочек сдвинуты (по этой причине небольшие квадраты кажутся вертикальными прямоугольниками). Строением сетчатки глаза и обусловлен тот факт, что взаимный сдвиг двух соседних штрихов распознается еще и тогда, когда расстояние между их изображениями на сетчатке меньше диаметра колбочки. Наилучшие результаты при нониусном совмещении могут быть достигнуты только при длительной практике, безупречном освещении, правильном выборе длины и толщины штрихов; кроме того, необходимо, чтобы шкала и нониус соприкасались по четкой линии раздела. Утолщение штрихов у линии раздела или малейший разъединяющий их промежуток значительно снижает чувствительность поперечной наводки.

Пример. Определить чувствительность поперечной установки перекрестия окуляра микроскопа на тонкий штрих шкалы объекта-микрометра. Объектив микроскопа имеет линейное увеличение $\beta = 3,7\times$, числовую апертуру $A = \sin \sigma = 0,11$. Видимое увеличение окуляра $\bar{\Gamma} = 8\times$.

В угловой мере чувствительность поперечной наводки $\psi = 10'' = 5 \times 10^{-5}$ рад, в линейной мере $\Delta_y = 0,05/\sigma = 0,4$ мкм. Этот же результат можно получить иначе. Оптическая система микроскопа эквивалентна оптической системе окуляра или лупы с фокусным расстоянием $f' = 250/\Gamma_m$, где $\Gamma_m = \beta\bar{\Gamma} = 29,6\times$. Следовательно, $f' = 8,44$ мм, а $\Delta_y = f'\psi \approx 0,4$ мкм.

Пример. Определить погрешность наведения визирной оси зрительной трубы с видимым увеличением $\Gamma_T = 10\times$ на телеграфный столб, находящийся от наблюдателя на расстоянии $L = 100$ м.

Изображение столба, построенное объективом в его задней фокальной плоскости, можно считать толстым штрихом по отношению к тонкой линии перекрестия, расположенного в передней фокальной плоскости окуляра. Поэтому чувствительность ψ поперечной наводки примем равной $60''$. В пространстве предметов погрешность наведения $\psi' = \psi/\Gamma_T = 6''$. В линейной мере в плоскости предметов погрешность наведения $\Delta = \psi'L = 6 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \text{ м} = 3 \text{ см}$.

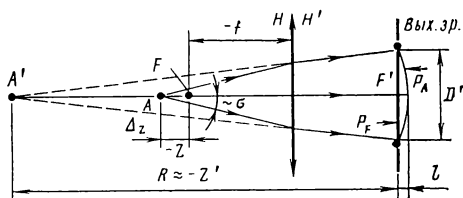


Рис. 3. Ход лучей при продольной наводке

Продольная наводка (фокусировка) используется чаще, чем поперечная, так как она выполняется не только в процессе измерений, но и для получения резкого изображения объектов в целях визуального их наблюдения.

Пусть NN' — главные плоскости (рис. 3) лупы, микроскопа или окуляра зрительной трубы. В переднем фокусе F расположен центр перекрестия или шкалы. Предметная точка A , созданная, например, предшествующей частью оптической системы, расположена на расстоянии Δ_z от точки F . Целью продольной наводки является совмещение точек A и F с максимально возможной точностью.

Предположим, что выходной зрачок прибора, с которым совмещен зрачок глаза наблюдателя, находится вблизи заднего фокуса F' окуляра. Действительно, если рассматриваемая система — простая труба Кеплера, то, как известно из геометрической оптики, выходной зрачок удален от задней фокальной плоскости окуляра на расстояние f'/Γ_T , где f' — заднее фокусное расстояние окуляра, равное переднему фокусному расстоянию, Γ_T — видимое увеличение зрительной трубы. Если, например, $f' = 25$ мм, $\Gamma_T = 10\times$, то удаление выходного зрачка от заднего фокуса F' равно 2,5 мм.

Лучи света, идущие из точки F , по выходе из окуляра образуют плоский волновой фронт P_F , а лучи света, идущие от точки A — сферический волновой фронт P_A . Центром сферического волнового фронта является точка A' — изображение точки A , а радиус R сферического волнового фронта равен расстоянию от точки A' до плоскости выходного зрачка или, что практически то же самое, до точки F' . Для вычисления радиуса R воспользуемся формулой Ньютона: $zz' = -f'^2$.

В нашем случае $z = \Delta_z$ и $z' = -R$, поэтому $R = f'^2/\Delta_z$. Стрелка прогиба сферической поверхности с радиусом R на диаметре D' вычисляется по формуле $l \approx D'^2/(8R)$. Приняв, как и прежде, чувствительность глаза к взаимному смещению волновых фронтов 0,1 мкм при $D' = 2$ мм и положив $l = 0,1$ мкм, с учетом $\sigma = D'/(2f')$ (рис. 3) найдем

$$\Delta_z = b/\sigma^2, \quad (11)$$

где $b = 0,2$ мкм.

Таким образом, чувствительность продольной и поперечной наводок зависит только от значения апертурного угла σ в про-

странстве предметов и от способности глаза к обнаружению взаимного смещения волновых фронтов на 0,1 мкм при диаметре выходного зрачка $D' = 2$ мм.

Пример. Определить чувствительность продольной наводки микроскопа с числовой апертурой $A = \sin \sigma = 0,11$ на плоскость предметов.

Используя формулу (11), найдем $\Delta_z = 16,5$ мкм, что в 4 раза больше чувствительности поперечной наводки микроскопа с такой же числовой апертурой (см. пример, приведенный выше).

Повышение чувствительности наводок. Из сравнения формул (10) и (11) следует, что при заданной числовой апертуре в пространстве предметов чувствительность поперечной наводки всегда выше чувствительности продольной наводки:

| | | | |
|-------------------------------|------|-----|------|
| σ | 0,05 | 0,1 | 0,2 |
| Δ_y , мкм | 1 | 0,5 | 0,25 |
| Δ_z , мкм | 80 | 20 | 5 |
| Δ_z/Δ_y | 80 | 40 | 20 |

Во многих практических случаях чувствительность продольных и поперечных наводок оказывается недостаточной. В связи с этим постоянно изыскиваются новые и совершенствуются существующие способы повышения чувствительности наводок. Рассмотрим некоторые из них.

Для повышения чувствительности продольной наводки можно использовать способ раздвоения изображения с помощью оптических клиньев, установленных в передней фокальной плоскости окуляра (рис. 4, а). Оптические клинья 1 и 2 имеют одинаковую конструкцию, но их основания ориентированы в противоположные стороны (рис. 4, б). Пусть точка A — (рис. 4, а) — след штриха, направленного перпендикулярно плоскости рисунка. Если точка A не совмещена с передним фокусом F окуляра, заданного главными плоскостями HH' , то наблюдатель, глаз которого установлен за окуляром, увидит границу раздела клиньев и «разорванное» изображение штриха (рис. 4, в). Вызвано это тем, что лучи света, проходящие через клинья, отклоняются к их основаниям, т. е. в противоположные стороны.

Точки A'_1 и A'_2 (см. рис. 4, а) являются следами изображений штриха A , построенных соответственно клиньями 1 и 2. Расстояние $A'_1A'_2$ можно вычислить по формуле $A'_1A'_2 = \Delta (n - 1)\theta$, где $\Delta = AF$, n — показатель преломления клиньев, θ — пре-

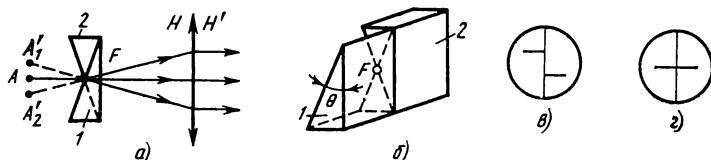
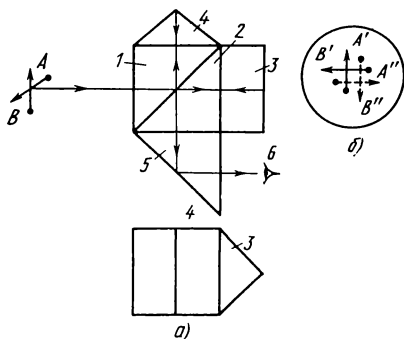


Рис. 4. Ход лучей в устройстве для повышения чувствительности продольной наводки с помощью оптических клиньев:

а — схема устройства; б — блок оптических клиньев; в — вид поля изображения при расфокусировке; г — то же, при отсутствии расфокусировки

Рис. 5. Ход лучей в устройстве для повышения чувствительности поперечной наводки с помощью блока призм: *а* — блок призм; *б* — вид поля изображения при поперечной наводке



ломляющий угол клиньев. Если след штриха *A* совмещен с точкой *F*, то штрих окажется расположенным одновременно на плоских поверхностях обоих клиньев. В этом случае видна граница раздела клиньев и изображение штриха в виде прямой линии (рис. 4, *г*). Очевидно, что по мере приближения штриха *A*

к передней фокальной плоскости окуляра половинки изображения штриха (рис. 4, *в*) приближаются одна к другой в направлении, перпендикулярном к оптической оси, т. е. продольная наводка преобразована в поперечную. Исследования показали, что этим способом чувствительность продольной наводки повышается, но не более чем в 2 раза.

Для повышения чувствительности поперечных наводок используется призмный блок (рис. 5, *а*), устанавливаемый в окулярной головке измерительных микроскопов. Блок состоит из пяти склеенных прямоугольных призм. Призмы 1 и 2 образуют кубик с полупрозрачной гипотенузной гранью. Призмы 3 и 4 наклеены на боковые грани кубика так, что ребра их прямых углов расположены взаимно перпендикулярно. Призма 5 служит для вывода лучей к глазу 6 наблюдателя.

Если в плоскости предметов расположены две стрелки *A* и *B* (см. рис. 5, *а*), то их изображения, построенные призмным блоком, представляют собой две системы стрелок: *A'*, *B'* и *A''*, *B''* (рис. 5, *б*). Если точка пересечения стрелок *A* и *B* расположена на оси системы, то и изображения противоположно ориентированных стрелок будут иметь общую точку пересечения, в противном случае они сдвинутся в поперечных направлениях.

Преимущество рассмотренного способа заключается в том, что значительное повышение чувствительности поперечной наводки достигается сравнительно простой конструкцией призмного блока. Однако требования к точности изготовления призм и их взаимной ориентации очень высокие, что и является основным недостатком способа.

Существуют и другие способы повышения чувствительности продольных наводок, в которых субъективные оценки наблюдателя исключены благодаря применению фотоэлектрического способа наведения. Однако эти способы, перспективные по своей сути, пока не нашли широкого применения в практике оптических измерений. Некоторые из них подробно описаны в специальной литературе.

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Разнообразные приборы и приспособления, применяемые в практике оптических измерений, можно условно разделить на две группы. Первую группу составляют приборы многоцелевого назначения, функциональное применение которых в каждом конкретном случае зависит от цели измерения. Например, автоколлимационный окуляр, установленный в зрительную трубу вместо обычного окуляра, превращает ее в автоколлимационную зрительную трубу, с помощью которой можно измерять пирамидальность призм, проверять прямолинейность направляющих металлорежущих станков, контролировать правильность расположения плоских поверхностей и т. д. Такой же автоколлимационный окуляр, установленный в измерительный микроскоп вместо обычного окуляра, превращает его в автоколлимационный микроскоп, с помощью которого можно измерять радиусы сферических поверхностей, проверять центрировку оптических систем, контролировать толщины линз и воздушных промежутков между ними и т. п. К первой группе приборов относятся, например, оптические скамьи, коллиматоры, зрительные трубы, автоколлимационные окуляры, измерительные микроскопы, гониометры и др.

Вторую группу составляют приборы специального назначения, предназначенные для решения конкретных измерительных задач. Например, рефрактометры предназначены только для измерения показателя преломления и дисперсии оптических материалов, сферометры — для измерения радиусов сферических поверхностей, фокометры — для измерения фокусных расстояний и т. д. Однако нередки случаи, когда приборы второй группы находят новое, функционально не свойственное им применение. Например, с помощью сферометра можно контролировать форму асферических поверхностей оптических деталей.

Рассмотрим основные приборы и приспособления, наиболее часто встречающиеся в практике оптических измерений.

Оптическая скамья. Этот комплексный прибор имеет многоцелевое назначение. В комплект оптической скамьи, как правило, входят коллиматор, зрительная труба с набором автоколлимационных окуляров, измерительный микроскоп с набором объективов и окуляров, диоптрийная трубка, набор тест-объектов (штриховые и радиальные миры, точечные диафрагмы, раздвижная щель), источники света, механические приспособления для крепления оптических деталей и т. п.

Приборы, узлы и приспособления, входящие в комплект оптической скамьи, монтируются на массивном основании — станине длиной 2 ... 8 м. Заводские лаборатории иногда изготавливают для собственных нужд специализированные оптические скамьи дли-

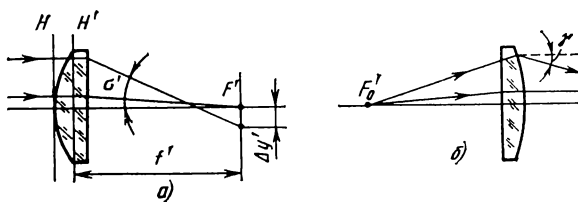


Рис. 6. Выпукло-плоская линза в роли объектива коллиматора при ходе лучей:
а — прямом; б — обратном

ной 12 ... 30 м и более. Наша промышленность серийно выпускает оптические скамьи ОСК-2 и ОСК-3 с фокусным расстоянием объектива коллиматора соответственно 1600 и 1000 мм. Все остальные комплектующие изделия одинаковые.

Коллиматор. Этот оптический прибор состоит из объектива и тест-объекта, расположенного в его задней фокальной плоскости. С помощью коллиматора можно получить параллельный пучок лучей, выходящих из объектива коллиматора, если в заднем фокусе его расположить непрозрачный экран с малым отверстием в центре (так называемую «точку» или точечную диафрагму), или изображение любого другого тест-объекта, расположенное на бесконечно большом расстоянии от объектива. Поэтому основное функциональное назначение коллиматора заключается в создании высококачественного бесконечно удаленного изображения какого-либо тест-объекта (точечной диафрагмы, миры, щели, перекрестия и т. п.).

Наиболее важным элементом коллиматора является объектив, роль которого могут выполнять простые линзы, двухлинзовые объективы, сферические и параболические зеркала. Рассмотрим особенности их применения в качестве объектива коллиматора.

Простую одиночную линзу используют в роли объектива коллиматора, как правило, в интерферометрах, так как в последних обычно применяется монохроматическое излучение. С технологической и абберационной точек зрения наиболее благоприятной является выпукло-плоская линза, выпуклая поверхность которой обращена к параллельному пучку лучей (рис. 6, а). Простые линзы в роли объективов коллиматоров используются, как правило, с малыми относительными отверстиями (1 : 8 ... 1 : 15), поэтому к ним применимы формулы теории аббераций третьего порядка. Для вычисления поперечной сферической абберации выпукло-плоской линзы можно использовать формулу

$$\Delta y' = -\frac{f'}{2} P^* \sigma'^3, \quad (12)$$

где f' — фокусное расстояние линзы; P^* — коэффициент, характеризующий сферическую абберацию линзы; σ' — угол луча с осью.

Для выпукло-плоской линзы

$$P^* = \frac{1}{n^2} \left[n^2 - 1 + \frac{1}{(n-1)^2} \right], \quad (13)$$

где n — показатель преломления линзы.

При $n = 1,5$ коэффициент $P^* = 2,33$, при $n = 1,75$ $P^* = 1,25$, поэтому с абберационной точки зрения целесообразно использовать линзы с большим показателем преломления.

Волновую абберацию линзы можно получить интегрированием формулы (12):

$$l_0 = \int_0^{\sigma'} \Delta y' d\sigma' = -\frac{f'}{8} P^* \sigma'^4. \quad (14)$$

Значение l_0 относится к сфере сравнения, центр которой совмещен с параксиальным фокусом F'_0 . Если центр сферы сравнения сдвинуть в направлении к линзе на значение $0,75\Delta s'$, где $\Delta s'$ — продольная сферическая абберация линзы, то поперечная абберация будет уменьшена приблизительно в 4 раза. Удачным выбором сферы сравнения волновую абберацию линзы можно уменьшить в несколько раз.

Если точечный источник света расположить строго в точке F'_0 (рис. 6, б), то параксиальные лучи выйдут из линзы строго параллельно оптической оси, а крайние — под углом γ к ней. Угол γ характеризует угловую сферическую абберацию луча, который в обратном ходе имел поперечную сферическую абберацию $\Delta y'$. Для вычисления угла γ можно воспользоваться формулой

$$\gamma = \Delta y' / f' = -P^* \sigma'^3 / 2. \quad (15)$$

Приведенные формулы позволяют рассчитать параметры линзы, используемой в качестве объектива коллиматора, с точки зрения допустимой остаточной волновой абберации, которая, как правило, не должна превышать четверти длины волны света (критерий Рэлея).

Пример. Рассчитать параметры линзы со световым диаметром $D = 20$ мм, используемой в качестве объектива коллиматора лазерного интерферометра. Остаточная волновая абберация линзы не должна превышать $\lambda/4$, где $\lambda = 632,8$ нм — длина волны излучения гелий-неонового лазера.

Выберем для линзы стекло ТФ5 с показателем преломления $n = 1,74971$ и вычислим по формуле (13) коэффициент $P^* = 1,2545$. Преобразуем формулу (14) исходя из того, что $\sigma' = D/(2f')$:

$$|l_0| = \frac{P^* D^4}{128 f'^3}, \quad \text{откуда } f' = D \sqrt[3]{\frac{P^* D}{128 |l_0|}}.$$

Положив $|l_0| = 0,16$ мкм, найдем $f' = 214$ мм. Вычислим радиус сферической поверхности линзы $r = f'(n-1) = 160,44$ мм. Из конструктивных соображений выберем толщину линзы $d = 4$ мм. Задний фокальный отрезок линзы $s'_{F'} = f' - d/n = 211,714$ мм. С помощью формул (12) и (15) вычислим сферическую абберацию линзы для крайнего луча: поперечную $\Delta y' = -0,0137$ мм; продольную $\Delta s' = \Delta y' \sigma = -0,293$ мм; угловую $\gamma = -6,4 \cdot 10^{-5} = 13''$. Распо-

ложим источник света в плоскости наилучшего изображения, сдвинутой от фокальной плоскости в сторону линзы на значение $0,75\Delta s' = 0,22$ мм, т. е. на расстояние 213,78 мм от плоской поверхности линзы.

Двухлинзовые объективы коллиматоров, склеенные или с воздушным промежутком между линзами, имеют значительно более широкие диапазоны фокусных расстояний и относительных отверстий, чем простые линзы. Диаметры объективов, склеенных из двух линз, как правило, не превышают 150 мм. Двухлинзовые объективы с воздушным промежутком между линзами имеют световые диаметры 100 ... 300 мм. В абберационном отношении двухлинзовые объективы коллиматоров, как правило, хорошо скорректированы на сферическую и хроматические aberrации, в них выполняется условие синусов, но угловые поля сравнительно невелики ($1 \dots 2^\circ$). Относительные отверстия двухлинзовых объективов коллиматоров лежат в пределах $1 : 5 \dots 1 : 12$. Заключение о возможности использования линзового объектива в роли объектива коллиматора принимается в каждом конкретном случае на основании рассмотрения его абберационных характеристик и требований к качеству коллиматора.

Сферическое вогнутое зеркало, используемое в качестве объектива коллиматора, имеет, как правило, сравнительно большие диаметры (свыше 300 мм). Главное преимущество такого объектива заключается в сравнительно простой конструкции и в полном отсутствии хроматических aberrаций; основной недостаток — в наличии центрального экранирования. Устранение этого недостатка путем введения дополнительных оптических элементов приводит к увеличению световых потерь.

Для сферического зеркала коэффициент P , характеризующий его сферическую aberrацию, равен 0,25, поэтому волновую aberrацию сферического зеркала можно вычислить по формуле (14):

$$|l_0| = \frac{f'}{32} \sigma'^4 = \frac{f'}{512} \left(\frac{D}{f'} \right)^4 = \frac{f'}{512K^4}, \quad (16)$$

где $K = f'/D$ — диафрагменное число (величина, обратная относительному отверстию).

В плоскости наилучшего изображения волновая aberrация может быть уменьшена по крайней мере в 4 раза по сравнению с волновой aberrацией, вычисленной по формуле (16). На основании критерия Рэлея остаточная волновая aberrация должна быть меньше $\lambda/4$, поэтому

$$\frac{D}{2048K^3} \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (17)$$

Результаты вычислений по формуле (17) представлены в табл. 2, с помощью которой можно выбрать сферическое зеркало, выполняющее функции объектива коллиматора.

Сферическое зеркало в качестве объектива коллиматора используется, как правило, совместно со вспомогательным плоским

Параметры сферических зеркал, удовлетворяющих критерию Рэлея
для длины волны $\lambda = 0,6$ мкм

| D , мм | f' , мм | K | D , мм | f' , мм | K |
|----------|-----------|--------|----------|-----------|--------|
| 50 | 272,99 | 5,460 | 700 | 9 211,33 | 13,159 |
| 100 | 687,90 | 6,879 | 800 | 11 006,39 | 13,758 |
| 200 | 1733,40 | 8,667 | 900 | 12 878,00 | 14,309 |
| 300 | 2976,37 | 9,921 | 1000 | 14 820,34 | 14,820 |
| 400 | 4367,89 | 10,920 | 1250 | 19 955,90 | 15,965 |
| 500 | 5881,46 | 11,763 | 1500 | 25 447,57 | 16,965 |
| 600 | 7499,98 | 12,500 | 2000 | 37 344,91 | 18,672 |

зеркалом 2 (рис. 7, а), при этом центральное экранирование пучка лучей неизбежно. Для его устранения используют плоскопараллельную пластину 3 (рис. 7, б), у которой поверхность, обращенная к сферическому зеркалу 1, выполняет функции плоского зеркала. Большие световые потери и высокие требования к качеству поверхностей пластины и однородности стекла являются основными недостатками схемы.

В качестве объектива коллиматора используют также параболическое зеркало, создающее идеально плоский волновой фронт при расположении точечного источника света в фокусе параболоида с любым относительным отверстием. Это свойство часто используют для устранения центрального экранирования, располагая источник света в заднем фокусе F' параболоида (рис. 8), вершина O которого расположена вне зеркала. Однако изготовление высококачественного параболического зеркала — более трудоемкая задача, чем изготовление сферического зеркала. Параболические зеркала в роли объективов коллиматоров в основном используют для инфракрасной области спектра, где длина волны сравнительно велика, поэтому требования к точности изготовления зеркала сравнительно невысокие.

Автоколлимационные окуляры. Они предназначены для направления в объектив зрительной трубы, коллиматора или микроскопа пучка лучей от освещенной диафрагмы, сетки или шкалы и рассматривания их автоколлимационного изображения, построенного лучами, отраженными от плоской или сферической поверх-

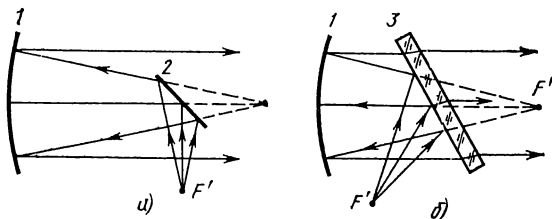


Рис. 7. Схемы объективов коллиматоров на основе сферического зеркала с использованием вспомогательных элементов:
а — плоского зеркала; б — плоскопараллельной пластины

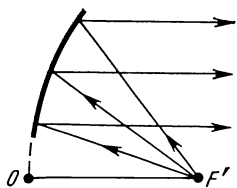


Рис. 8. Внеосевое параболическое зеркало в роли объектива коллиматора

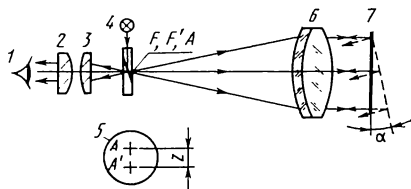


Рис. 9. Автоколлимационная зрительная труба

ности объекта измерения. Автоколлимационные окуляры отличаются от обычных тем, что они содержат дополнительные оптические элементы (призмы или плоскопараллельные пластины), осветительную систему (низковольтную лампочку и конденсорную линзу) и тест-объекты (сетки, диафрагмы, шкалы), расположенные в передней фокальной плоскости окуляра (рис. 9). В том случае, когда имеет место строго автоколлимационный ход лучей, т. е. лучи света, отраженные от объекта измерения, проходят тот же путь, что и при прямом ходе, но в обратном направлении, изображение тест-объекта строится на самом тест-объекте и совмещается с ним. Для наблюдения тест-объекта и его автоколлимационного изображения используется линзовая часть окуляра. Автоколлимационный окуляр, установленный вместо обычного окуляра в зрительную трубу или микроскоп, превращает их соответственно в автоколлиматор и автоколлимационный микроскоп.

Рассмотрим принцип действия автоколлимационного окуляра, установленного вместо обычного окуляра в зрительную трубу типа Кеплера (рис. 9). Линзовая часть окуляра (линзы 2 и 3) представляет собой окуляр Рамсдена, в фокальной плоскости которого расположена пластина 5, состоящая из двух склеенных призм с полупрозрачной гранью. На поверхности пластины 5, обращенной к объективу 6, выгравировано перекрестие A , центр которого совмещен с передним фокусом F окуляра и задним фокусом F' объектива 6. Для освещения перекрестия используют низковольтную лампочку 4, от которой лучи света проникают в пластину 5 через боковую поверхность. Лучи света, идущие из центра перекрестия A , выходят параллельным пучком из объектива 6 и падают на отражающую поверхность 7. Если последняя установлена перпендикулярно к падающим на нее лучам, то после отражения лучи совершают свой путь в обратном направлении и строят автоколлимационное изображение A' перекрестия, точно совмещенное с самим перекрестием A . В глаз 1 наблюдателя поступают лучи, идущие как от самого перекрестия A , так и от его автоколлимационного изображения A' . Если поверхность 7 наклонена на угол α , то автоколлимационное изображение A' сместится на расстояние z относительно A , причем $z =$

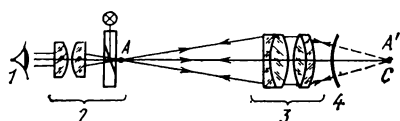


Рис. 10. Автоколлимационный микроскоп

решения важных практических задач, например для измерения радиусов сферических поверхностей. Автоколлимационный окуляр 2 (рис. 10) устанавливают вместо окуляра микроскопа так, чтобы фокальная плоскость окуляра совместилась с плоскостью изображения объектива 3. Если действительное изображение A' перекрестия A совместить с центром кривизны C сферической отражающей поверхности 4, то лучи света после отражения от поверхности 4 поступают в глаз I наблюдателя. В плоскости изображения видно перекрестие A и смещенное с ним автоколлимационное изображение A' (аналогично плоскости изображения в автоколлимационной зрительной трубе). Таким образом, совмещение перекрестий A и A' является признаком того, что предметная точка микроскопа совместилась с центром кривизны сферической поверхности или с ее вершиной. Если точка A' смещена от точки C в поперечном направлении на расстояние Δ_y , то автоколлимационное изображение перекрестия в фокальной плоскости окуляра сместится относительно точки A на расстояние $\Delta'_y = \Delta_y \beta$, где β — линейное увеличение объектива микроскопа.

Наиболее широкое применение на практике получили автоколлимационные окуляры Аббе, Гаусса, Монченко, окуляр с куб-призмой (рис. 11). Типовая конструкция автоколлимационного окуляра состоит из источника света I , линзовой части 2 и призмного блока 3. В переднем фокусе F окуляра располагается центр перекрестия или шкалы, гравированной на поверхности пластины или призмы.

В окуляре Аббе (рис. 11, а) прямоугольная призма приклеена к пластине, расположенной в фокальной плоскости окуляра. Призма экранирует часть плоскости изображения (рис. 11, б),



Рис. 11. Типы автоколлимационных окуляров: а — Аббе; б — Гаусса; в — Монченко; г — окуляр с куб-призмой; д — вид поля изображения в окуляре Аббе

что является основным недостатком этого окуляра. Кроме того, призма не позволяет совместить центр автоколлимационного изображения с действительным центром, находящимся на визирной оси автоколлиматора или микроскопа. Световые потери в автоколлиматоре с окуляром Аббе достигают 70 %.

В окуляре Гаусса (рис. 11, б) полупрозрачная пластина 3 установлена под углом 45° к оптической оси между линзовой частью 2 и сеткой 4, поэтому требуется большое фокусное расстояние линзовой части окуляра. В связи с этим окуляры Гаусса имеют небольшое увеличение (приблизительно $5\times$). К недостаткам окуляра Гаусса относятся двоение изображения сетки вследствие отражения лучей от обеих граней наклонной пластины и большие световые потери (около 85 %).

В окуляре Монченко (рис. 11, в) призмный блок 3 состоит из двух склеенных между собой призм. На одной из склеиваемых поверхностей призмы, обращенной к объективу трубы или микроскопа, нанесена сетка с зеркальными штрихами, от которых отражаются лучи света и поступают в объектив. Так как сетка наклонена к оптической оси, то четкое изображение ее возможно только в пределах глубины резкости окуляра. Световые потери составляют 60 ... 65 %.

В окуляре с кубом-призмой 3 (рис. 11, г), расположенной между линзовой частью 2 и сетками 4, световые потери достигают 90 %. Куб-призма содержит две прямоугольные призмы, склеенные гипотенузными гранями с полупрозрачным покрытием. Сетки 4 должны быть установлены точно в фокальной плоскости окуляра. Аберрационный расчет окуляра должен выполняться с учетом действия призмы. В окуляре можно устанавливать различные сетки и шкалы, что создает удобства при работе с ним.

Измерительные микроскопы. По конструкции и назначению их можно разделить на две группы. К одной группе относятся микроскопы с отсчетными шкалами, установленными в передней фокальной плоскости окуляров. Они используются для измерения объектов малых размеров, изображения которых не превышают линейного поля окуляра. К другой группе относятся микроскопы, измерения на которых выполняют перемещением предметного стола вместе с объектом. В микроскопах обеих групп наблюдатель совмещает перекрестие окуляра с изображением выбранных на объекте отметок. По числу измеряемых координат объекта микроскопы второй группы можно разделить еще на три подгруппы: однокоординатные, двухкоординатные (малые и большие инструментальные) и трехкоординатные (универсальные).

Универсальные микроскопы дают возможность измерять объекты по трем координатам и снабжены дополнительными приспособлениями, позволяющими проверять различные по форме и размерам изделия. Все инструментальные и универсальные микроскопы (табл. 3), а также микроскоп типа ОКМ имеют только подвижные предметные столы.

Параметры измерительных микроскопов

| Параметры | ММИ | БМИ, БМИ-1 | УИМ-21 | УИМ-23 | УИМ-24 |
|--------------------------------|------------|----------------|--------------------------|----------------|------------|
| Пределы измерения длин, мм: | | | | | |
| в продольном направлении | 0 ... 75 | 0 ... 150 | 0 ... 200 | 0 ... 200 | 0 ... 200 |
| в поперечном направлении | 0 ... 25 | 0 ... 50 | 0 ... 100 | 0 ... 100 | 0 ... 200 |
| Пределы измерения углов, ° | 0 ... 360 | 0 ... 360 | 0 ... 360 | 0 ... 360 | 0 ... 360 |
| Цена деления: | | | | | |
| отсчетного устройства, мм | 0 ... 0,1 | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| шкалы угломерной головки, мин | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Видимое увеличение микроскопов | 10, 30, 50 | 10, 15, 30, 50 | 10, 15, 30, 50 | 10, 15, 30, 50 | 10, 20, 30 |
| Линейное увеличение объективов | 1; 3,5 | 1; 1,5; 3,5 | 1; 1,5; 3,5 | 1; 1,5; 3,5 | 1; 2,3 |
| Видимое увеличение окуляров | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Диаметр линейного поля, мм | 21; 7; 4,2 | 21; 14; 7; 4,2 | 16; 2; 10,8; 5,4; 3,2 | 18; 12; 6; 3,6 | 18; 9,6 |
| Масса прибора, кг | 27 | 95 | 414 | 540 | 1550 |

Инструментальные микроскопы малые (ММИ) и большие (БМИ) предназначены для измерения не только линейных, но и угловых размеров объектов в прямоугольных и полярных координатах, а также для измерения профилей наружных резьб, углов шаблонов, элементов зубчатых передач, конусов и т. п.

Большие инструментальные микроскопы БМИ и БМИ-1 имеют идентичные оптические схемы (рис. 12) и отличаются тем, что БМИ-1 снабжен дополнительными приспособлениями для измерения диаметров отверстий и изделий по высоте. Пучок лучей, идущий от лампы 1, проходит через линзы 2, 4 и 6 осветительной системы и защитное стекло 3 (зеркало 5 служит для излома оси) и освещает предметный стол 7, на котором установлены контролируемые объекты. Объектив 8 через призму 9 и защитные стекла 10 строит изображение объекта на сетке 11. Полевая 12 и проекционная 13 линзы, призма 14, поворачивающая изображение на 90°, и зеркало 15 проецируют изображение объекта и сетки на экран 16.

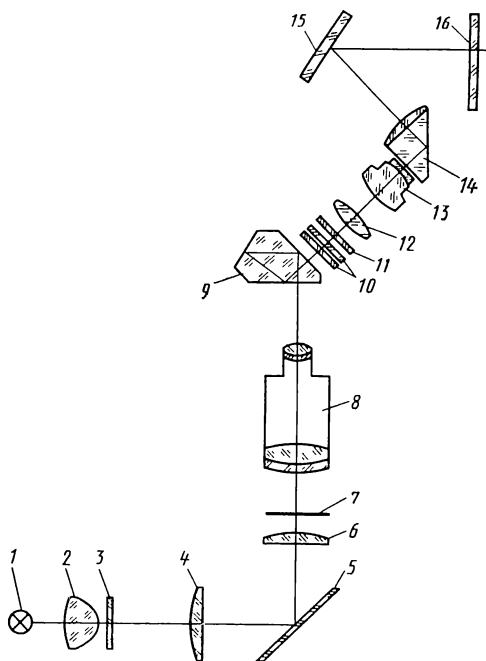


Рис. 12. Оптическая схема большого инструментального микроскопа

В целях повышения точности измерений в микроскопах используют телецентрический ход лучей, устанавливая апертурную диафрагму в передний или задний фокус объектива. В тех случаях, когда плоскость предметов занимает стационарное положение относительно объектива, а измерительную сетку окуляра совмещают с плоскостью изображений, апертурную диафрагму устанавливают в передний фокус объектива. Если измерительная сетка окуляра занимает стационарное положение относительно объектива, а микроскоп фокусируют на плоскость предметов, то апертурную диафрагму устанавливают в задний фокус объектива.

Наибольшие пределы измерений и высокую точность имеют универсальные измерительные микроскопы УИМ-21, УИМ-23 и УИМ-24 (см. табл. 4). Их назначение подобно назначению инструментальных микроскопов, а большое число дополнительных приспособлений к ним позволяет осуществлять измерения изделий различной формы. Например, микроскоп УИМ-21 комплек-

туется следующими дополнительными приспособлениями: вертикальным длиномером ИЗВ-21 для измерения координаты по высоте, приспособлением ИЗО-1 для измерения внутренних размеров контактным методом и приспособлением ИЗО-2 для измерения бесконтактным методом, профильной окулярной головкой ОГР-23, окулярной головкой двойного изображения ОГУ-22, круглым столом СТ-9, столом СТ-2 с высокими центрами, измерительной бабкой ИБ-21М, призматическими опорами ОП-23, проекционной насадкой ПН-7 и объективами МТ-22, МТ-23, МТ-24; МТ-22а, МТ-23а, МТ-24а.

Измерение длины на универсальном микроскопе выполняется теневым (проекционным) методом в проходящем свете и методом осевого сечения.

Предельные погрешности измерения определяются эмпирическими формулами. Погрешность измерения длины детали в продольном направлении

$$\Delta L = \pm \left(3 + \frac{L}{30} + \frac{HL}{4000} \right);$$

в поперечном направлении

$$\Delta L = \pm \left(3 + \frac{L}{50} + \frac{HL}{2500} \right).$$

Погрешность измерения высоты детали (с помощью ИЗВ-21)

$$\Delta H = \pm \left(1,4 + \frac{H}{140} \right).$$

Здесь ΔL и ΔH выражены в микрометрах, а L и H — в миллиметрах.

Универсальный измерительный микроскоп УИМ-23 имеет то же назначение, что и УИМ-21, и отличается тем, что снабжен оптической системой, проецирующей изображения измеряемого объекта и отсчетных шкал на экран. Микроскоп УИМ-23 укомплектован теми же дополнительными приспособлениями, что и УИМ-21. Кроме того, УИМ-23 снабжен проекционным вертикальным длиномером ИЗВ-23, отличающимся от вертикального длинмера ИЗВ-21 более сложной оптической системой и увеличением проекционной системы, равным $60\times$. Конструкции измерительных микроскопов постоянно совершенствуются.

Гониометр. Это лабораторный прибор, предназначенный для измерения углов между плоскими отражающими гранями оптических и механических деталей. Находит широкое применение и служит для измерения и контроля углов призм и оптических клиньев, показателей преломления и дисперсии оптических материалов в видимой и инфракрасной областях спектра, позволяет измерять фокусные расстояния объективов, видимое увеличение и угловое поле телескопических систем и т. п.

Промышленность выпускает гониометры различных типов, отличающиеся конструктивным оформлением и системами отсчет-

Характеристики гониометров-спектрометров

| Параметры | ГС30 | ГС10 | ГС5 | ГС1М |
|---|------|------|------|------|
| Фокусное расстояние объектива, мм | 250 | 250 | 400 | 674 |
| Световой диаметр объектива, мм | 40 | 40 | 50 | 70 |
| Видимое увеличение зрительной трубы с окуляром $f' = 9,8$ мм | 25,5 | 25,5 | 40,9 | 69 |
| Номинальная точность, " | 30 | 10 | 5 | 1 |
| Цена деления лимба, " | 60 | 20 | 20 | 10 |
| Цена деления отсчетного устройства, " | 60 | 1 | 1 | 0,5 |
| Расстояние между объективами зрительной трубы и коллиматора, мм | 160 | 160 | 250 | 540 |
| Высота прибора, мм | 330 | 330 | 470 | 1000 |
| Масса прибора, кг | 14,5 | 20 | 49,3 | 350 |

ных устройств. Однако во всех гониометрах имеются лимб (круг с градусными делениями), зрительная труба, коллиматор и отсчетное устройство. Серийно выпускаемые гониометры-спектрометры ГС30, ГС10, ГС5 и ГС1М имеют принципиально одинаковую конструктивную схему, но различные характеристики (табл. 4).

Гониометр-спектрометр ГС5 (рис. 13) состоит из массивного основания 21 с тремя подъемными винтами 1, вертикальной колонки 16 с коллиматором 13 и осевого устройства с алидадой 19, на котором расположена колонка 5 со зрительной трубой 9. Последнюю вместе с алидадой 19 можно вращать вокруг вертикальной оси вручную или микрометрическим винтом 2 (после закрепления алидады зажимным винтом 20).

С помощью подъемных винтов и круглого уровня, встроенного в корпус алидады, ось вращения прибора приводится в вертикальное положение. Зрительная труба и коллиматор имеют внутреннюю фокусировку, осуществляемую с помощью трубок 10, и одинаковые объективы с фокусным расстоянием 400,6 мм. Видимое увеличение трубы равно $40,9\times$, угловое поле $2\omega = 50'$. Для фиксации положения установок объективов на бесконечность и значений расфокусировок, появляющихся вследствие кривизны поверхности контролируемых деталей, трубы снабжены фокусируемыми отсчетными шкалами 14. Визирные оси зритель-

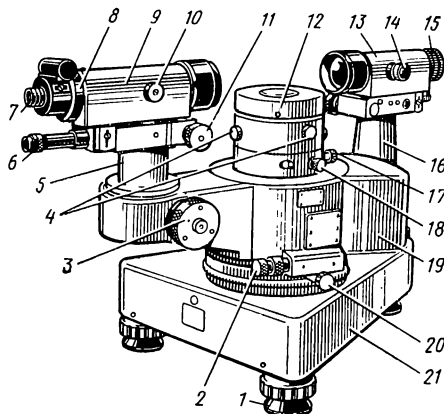


Рис. 13. Общий вид гониометра

ной трубы и коллиматора с помощью юстировочных винтов 11 могут быть установлены перпендикулярно к вертикальной оси вращения. Заменяв окулярные устройства, коллиматор можно превратить в зрительную трубу, а зрительную трубу — в коллиматор. Смена и закрепление окулярных устройств осуществляются зажимными кольцами 8 и 15. На верхней части вертикальной оси установлен предметный стол 12, который свободно вращается вручную, а после закрепления зажимным винтом 18 может вращаться вместе с лимбом при неподвижной зрительной трубе. На вертикальную ось прибора посажен стеклянный лимб с ценой деления $20'$ и цифровой шкалой через градус (от 0 до 359°). При включении или выключении специального механизма, помещенного на корпусе алидады, лимб может вращаться вместе с алидадой, самостоятельно при неподвижной алидаде и вместе со столом. Самостоятельное вращение лимба относительно алидады и стола осуществляется трибкой (на рис. 13 не показана), а вместе со столом — вручную и микрометрическим винтом 17. Стол может вращаться с лимбом при неподвижной зрительной трубе, совместно с лимбом и зрительной трубой и самостоятельно после отключения зажимного винта. С помощью двух регулировочных винтов 4, расположенных взаимно перпендикулярно, стол может быть наклонен и приведен в горизонтальное положение. Для установки на стол гониометра различных по высоте деталей предусмотрено несколько сменных дисков, закрепляемых на столе.

Перед работой на гониометре необходимо его отъюстировать, т. е. проверить установку труб на бесконечность, перпендикулярность визирной оси зрительной трубы к оси вращения алидады и параллельность визирных осей коллиматора и зрительной трубы. Настройка выполняется в три этапа.

Первый этап выполняют установкой трибок 10 по фокусировочным шкалам 14 на отметку ∞ . Если она отсутствует, то трубу устанавливают на бесконечность методом автоколлимации с помощью контрольной плоскопараллельной пластины. Установка коллиматора на бесконечность может быть выполнена так же, как и зрительной трубы (по отметке ∞) или по выверенной зрительной трубе.

На втором этапе проверяют совмещение автоколлимационного изображения перекрестия, полученного от поверхности плоскопараллельной пластины, с перекрестием зрительной трубы. Для этого плоскопараллельную пластину устанавливают на стол 12 и с помощью регулировочных винтов 4 приводят в положение, перпендикулярное к визирной оси зрительной трубы.

Отключив зажимной винт 18 и повернув стол с пластиной на 180° , проверяют совпадение по вертикали перекрестия сетки трубы с его автоколлимационным изображением от другой поверхности пластины. Несовпадение перекрестий исправляют так: половину интервала выбирают наклоном стола (винтами 4), а другую половину — наклоном трубы (юстировочным винтом 11).

Эту операцию повторяют до точного совмещения перекрестий от обеих поверхностей пластины. Затем пластину, расположенную на столе, поворачивают на 90° по отношению к первоначальному положению и снова наблюдают за совмещением перекрестий, исправляя несовпадение только наклоном стола (регулируемым винтом 4, ось которого перпендикулярна к пластине).

Выполнение третьего этапа обеспечивают совмещением изображения перекрестия сетки зрительной трубы с изображением перекрестия сетки, установленной в фокальной плоскости объектива коллиматора. Несовпадение перекрестий по высоте исправляется юстировочным винтом коллиматора.

В процессе измерений отсчеты углов поворота стола или зрительной трубы выполняют по лимбу с помощью отсчетного микроскопа 6, расположенного под окуляром 7 зрительной трубы 9. Увеличение отсчетного микроскопа $46\times$, цена деления шкалы $1''$. Для снятия отсчета маховичок 3 оптического микрометра необходимо повернуть до совмещения верхних и нижних штрихов лимба, видимых в левом окне поля изображения отсчетного микроскопа.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В оптических приборах источники излучения могут выполнять основную или вспомогательную функцию. Выбор источника излучения зависит от того, какие из параметров излучения наилучшим образом обеспечивают надежную работу прибора. К характеристикам излучения относятся поток излучения, спектральный состав, когерентность, направленность, режим излучения. Важны также срок службы, габаритные размеры, режим питания и стоимость источника.

Источники оптического диапазона могут создавать когерентное и некогерентное излучения. Когерентное излучение создают лазеры, некогерентное — тепловые и газоразрядные источники.

Лазеры (табл. 5). В оптических измерительных приборах широко применяются лазеры, поскольку свойства лазерного излучения способствуют повышению точности и надежности измерений. Монохроматичность и когерентность излучения необходимы в интерферометрии, голографии, спектроскопии и др.

Основными элементами лазера являются активная среда, в которой происходит усиление оптического излучения с определенной длиной волны, система возбуждения активной среды от внешнего источника энергии и оптический резонатор, формирующий частотные и пространственные характеристики излучения. Большинство современных лазеров генерируют как в многомодовом режиме, так и в одномодовом. При многомодовом режиме усиливаются колебания нескольких поперечных типов, вследствие чего обеспечивается высокая энергетическая светимость. Для одномодового режима излучения характерно уменьшение энергетической светимости, но вместе с тем улучшение когерентности

Таблица 5

| Тип лазера | Активная среда | Длина волны излучения, нм | Поток излучения, мВт в режиме | | Диаметр пучка, мм, в режиме | | Расходимость пучка, ' в режиме | | Размеры, мм | | | Длина когерентности, м | Срок службы, ч |
|----------------------------------|------------------------------------|---|--|--|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------|------------------------|------------------|
| | | | многомодовым | одномодовым | многомодовым | одномодовым | многомодовым | одномодовым | Длина | Ширина | Высота | | |
| ЛГ-36А ЛГИ-37 (импульсный) | Гелий—неон Ионизированный аргон | 632,8 526 535,3 539,7 595,5 430,7 495,4 500,8 632,8 632,8 488 514,5 496,5 476,5 465,8 632,8 1153 3391,3 632,8 941 694,3 | 80 | 40 2·10 ⁶ в импульсе длительно- стью 0,3 мкс | 5 | 2,5 4 | 5 | 1,8 6 | 1880 1500 | 290 400 | 300 345 | 0,2 0,3 | 500 100 |
| | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 750 500 30 |
| | | | — | 50 1 — | — 2 3 | 2,2 1,5 — | — 10 4 | 3000 360 1075 | 290 70 290 | 290 60 280 | — | — | — |
| ЛГ-126 | Гелий—неон | | 10 | — | — | — | 10 | — | 1150 | 126 | 146 | — | 750 |
| ЛГ-149 | Гелий—неон | | — | 0,5 | — | — | — | — | 820 | 350 | 170 | 100 | — |
| ОГМ-20 (импульсный) | Рубин | | 20 в им- пульсе дли- тельностью 15 нс | — | — | — | 2 | — | 915 | 523 | 1390 | — | — |

и монохроматичности излучения и уменьшение расходимости пучка. Поэтому при интерферометрических и спектральных исследованиях в основном используется одномодовый режим.

Лазерный пучок формируется резонатором и имеет своеобразную структуру. Если резонатор состоит из плоских зеркал, то излучение лазера представляет собой совокупность плоских волн, расходящихся под углами, определяемыми дифракцией. Резонатор со сферическими зеркалами на значительном расстоянии от лазера формирует волновой фронт, который можно считать сферическим только вблизи оси.

Наиболее подходящими для оптических измерительных приборов являются газовые лазеры на смеси гелия и неона. Они имеют большой срок службы, не требуют охлаждения, излучают в непрерывном режиме в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Активная среда заключена в разрядную стеклянную трубку с кварцевыми окнами, изготовленными в виде плоскопараллельных пластин, установленных так, чтобы нормаль к пластине составляла с осью трубки угол Брюстера. Активное вещество возбуждается электрическим током при напряжении $\sim 1 \dots 2$ кВ, причем зажигание разряда осуществляют с помощью дополнительного электрода, на который подают импульсное напряжение ~ 10 кВ. При этом происходит стимулированное когерентное излучение на длинах волн λ , равных 3391,3, 1153 и 632,8 нм, причем ширина спектральных линий $\sim 10^{-3}$ нм. Наибольшее применение находит излучение на длине волны 632,8 нм, поскольку она принадлежит видимой области спектра. Выделение нужной спектральной линии осуществляется подбором спектральных характеристик зеркал резонатора, а также введением диспергирующего или селективно поглощающего элемента.

Число мод лазера определяется конструкцией резонатора, а также диаметром разрядной трубки или введением в резонатор диафрагмы. Например, одномодовый режим излучения обеспечивается в лазере ЛГ-36А установкой разрядной трубки с меньшим диаметром капилляра, в ЛГ-55 — заменой сферического зеркала резонатора на плоское. Такие лазеры, как ЛГ-149 и ЛГ-38, имеют повышенную стабильность и воспроизводимость параметров излучения, причем ЛГ-38 имеет систему автоматической юстировки резонатора, реагирующую на смещение пучка.

В голографии применяют также ионные лазеры непрерывного действия и импульсные. Излучение таких лазеров может происходить одновременно на нескольких длинах волн в диапазоне $\lambda = 450 \dots 530$ нм, а в некоторых случаях в ближней ультрафиолетовой области в диапазоне $\lambda = 350 \dots 360$ нм. Недостаток ионных лазеров заключается в необходимости охлаждения активной среды. Газовые лазеры могут работать в импульсном режиме.

В качестве источников импульсного излучения в голографических исследованиях быстропротекающих процессов используются твердотельные лазеры. Активная среда возбуждается

под действием мощных световых импульсов, которые создаются импульсной газоразрядной (стробоскопической) лампой ИФП с ксеноновым наполнением. Энергия вспышки таких ламп составляет несколько тысяч джоулей, а максимум излучения приходится на длину волны $\lambda = 400$ нм. Наиболее употребительны рубиновые лазеры, поскольку они излучают в видимой области спектра, имеют большую длину когерентности, позволяют обеспечивать синхронизацию импульсов излучения с работой внешних устройств.

Тепловые источники. Излучение таких источников подчиняется законам теплового излучения. Идеальным тепловым излучателем считается абсолютно черное тело. Для паспортизации тепловых источников, а также приемников излучения применяют модели абсолютно черных тел, имеющие сложную конструкцию. Спектр их излучения приближенно соответствует спектру идеального излучателя. В приборах используются более простые по конструкции источники. Рассмотрим глобар, штифт Нернста и керамический источник, применяемые в инфракрасной спектродетекции.

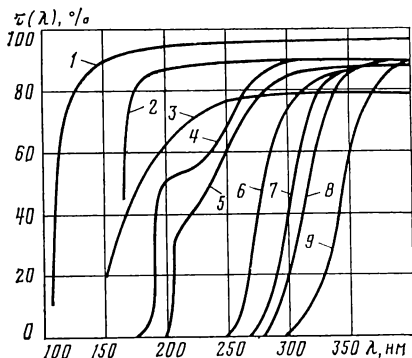
Глобар — стержень из карбида кремния длиной 50 ... 250 мм, диаметром 6 ... 8 мм с защитным слоем из двуокиси тория, через который пропускается электрический ток. Глобар нагревается до значения температуры 1400 К и излучает энергию в инфракрасном диапазоне длин волн, причем коэффициент излучения глобара в области 2 ... 15 мкм изменяется в пределах 0,7 ... 0,9. Эксплуатационный недостаток глобара заключается в необходимости принудительного отвода тепла и постоянной регулировке тока питания, которая требуется вследствие нарушения стабильности электроконтакта в процессе нагревания. Срок службы глобара составляет несколько сотен часов, потребляемая мощность до 250 Вт.

Штифт Нернста — стержень длиной 15 ... 30 мм и диаметром 1 ... 3 мм из порошкообразной двуокиси циркония и окиси иттрия. В холодном состоянии он представляет собой изолятор; начинает проводить ток только после предварительного разогрева до значения температуры 800 К специальным нагревателем из нихромовой проволоки. При значении температуры 2000 К штифт излучает энергию в инфракрасном диапазоне, в области 1,5 ... 5 мкм, коэффициент излучения штифта 0,44. Срок службы достигает 1000 ч, потребляемая мощность 50 Вт.

Керамический источник излучения представляет собой трубку длиной 40 мм и диаметром 3 мм. Внутри трубки помещена платиновая спираль, через которую пропускается электрический ток. При значении температуры 1300 К возникает излучение, причем коэффициент излучения, замеренный относительно глобара, в области 2 ... 15 мкм изменяется в пределах 0,25 ... 1. Керамический источник высокостабилен, не требует специального охлаждения, имеет малые габаритные размеры, потребляемая мощность 50 Вт.

Рис. 14. Спектральное пропускание материалов для колб и окон электровакуумных приборов при толщине образцов 1 мм:

1 — флюорит лития; 2 — кварц; 3 — сапфир; 4 и 5 — увиолевые стекла УТ-49 и УТ-88; 6, 7, 8 и 9 — стекла марок С-89-4, С-52-1, С-49-2 и С-89-2



Лампы накаливания (ГОСТ 19190—73) благодаря удобству в эксплуатации, надежности, большому сроку службы, малой инерционности, возможности регулировки потока излучения и простоте конструкции широко используются в измерительных приборах. В основном их применяют в качестве источников светового диапазона, хотя они имеют низкую световую отдачу, которая определяется как отношение светового потока, испускаемого лампой, к лучистому потоку.

Лампа накаливания имеет типовую конструкцию: внутри прозрачной колбы помещено тело накала, к которому присоединены электрические контакты, выведенные на цоколь. Тело накала в основном выполняется в виде спиралей: обыкновенной, плоской, многорядной или конической. В качестве основного материала для его изготовления используют вольфрам, спектр излучения которого соответствует спектру серого излучателя с коэффициентом излучения $\sim 0,5$. Вольфрам имеет высокую температуру плавления (3660 К) и малую скорость испарения, причем скорость испарения может быть снижена за счет покрытия тела накала слоем рения. Заполнение колбы инертными газами или их смесями, например криптоном, ксеноном, аргоном, азотом, водородом, продлевает срок службы лампы и увеличивает световую отдачу. Газонаполненные лампы имеют значение температуры тела накала 2900 ... 3000 К и максимум их излучения лежит в области $\lambda = 1$ мкм. Материал колбы выполняет роль светофильтра (рис. 14) и обуславливает диапазон спектральной светимости лампы.

В соответствии с ГОСТ 19190—73 для ламп накаливания задают габаритные и присоединительные размеры, а также электрические и световые параметры (табл. 6). Методы измерения параметров регламентированы ГОСТ 17616—82.

Для освещения шкал и лимбов в основном используются лампы МН — миниатюрные (ГОСТ 2204—80). В осветителях коллиматоров, автоколлиматоров, микроскопов, проекторов и теневых приборов применяются лампы ОП — для оптических приборов, К — для киноаппаратуры (ГОСТ 4019—74).

Особое место занимают галогенные лампы КГМ для киноаппаратуры, имеющие кварцевую колбу. Их действие основано на регенерации испарившегося вольфрама под влиянием галогена,

Характеристики ламп накаливания

| Тип лампы | Напряжение, В | Мощность, Вт, (ток, А) | Световой поток, лм (или сила света, кд, габарит- ная яркость, мкд/м²) | | |
|--------------|------------------|---------------------------|--|------------------|--|
| | | | | Диаметр колбы | |
| МН 3,5—0,26 | 3,5 | 0,26 А | 7,6 | 12 | |
| ОП 12—100 | 12 | 100 | 2500 | 51 | |
| К 12—30 | 12 | 30 | 530 | 25 | |
| КГМ 9—70 | 9 | 70 | 20 мкд/м² | 10,75 | |
| КГМ 6,6—45 | 6,6 | 45 | 750 | 8,5 | |
| ПЖ 24—1000 | 24 | 1000 | 23000 | 132 | |
| СИП 10—50 | 10 | 8,6 | 50 | 88 | |
| СИП 107—3500 | 107 | 260 | 3500 | 115 | |
| СИС 10—5 | 10 | 8,6 | 5 кд | 88 | |
| СИС 107—1500 | 107 | 915 | 1500 кд | 130 | |

находящегося в колбе. Вследствие разности температур между телом накала и колбой регенерированный вольфрам оседает на тело накала. Основные преимущества галогенных ламп — небольшие габаритные размеры при большой световой отдаче, высокая стабильность потока излучения, большой срок службы, отсутствие потемнения колбы в процессе эксплуатации — обуславливают их применение в приборах для световых и цветовых измерений.

Прожекторные лампы ПЖ (ГОСТ 7874—76) создают большой поток излучения. Тела накала прожекторных ламп представляют собой систему спиралей, образующую прямоугольник.

В фотометрии применяются специальные светоизмерительные лампы со стабильными световыми характеристиками. В соответствии с ГОСТ 10771—82 их выпускают двух типов: эталоны светового потока (СИП) и эталоны силы света (СИС). Важной характеристикой светоизмерительных ламп является цветовая температура, которая соответствует той температуре абсолютно черного тела, при которой оно дает спектр излучения, наиболее близкий к спектру излучения данной лампы.

Источники для измерений цвета воспроизводят спектры излучения, предусмотренные ГОСТ 7721—76 (рис. 15). Установлены четыре основных типа источников света: *A*, *B*, *C* и *D*₆₅.

Спектральная плотность потока излучения источника *A* в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при значении температуры 2856 К. Функцию источника *A* выполняет газополная лампа накаливания с вольфрамовым телом накала, режим питания которой регламентирован.

Источник *B* воспроизводит условия прямого солнечного освещения, а источник *C* — освещения рассеянным светом в видимой области спектра. В качестве этих источников применяют источ-

| Размеры, мм | | | | Срок службы, ч (или цве- товая темпе- ратура, К) | Тип цоколя |
|-------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------------|
| Длина | Высота светового центра | Ширина тела накала | Высота тела накала | | |
| 24 | — | — | — | 25 | E10/13 |
| 88 | 35 | 5,5×2,5 | 2,5 | 25 | 1Ф-С34-1 |
| 86 | 60±3,0 | 4 | 1,5 | 50 | E14/25×17 |
| 47 | — | 2,6 | 2,6 | 200 | Без цоколя |
| 60 | — | Спираль Ø 1,4×5,5 | | 1000 | Плоский |
| 500 | 105±3,0 | 14 | 14 | 100 | Специальный |
| 140 | 100 | 8 | 45 | 2360 К | E27/32×30 |
| 235 | 185 | 25 | 20 | 2800 К | E27/32×30 |
| 150 | 88 | 8 | 45 | 2360 К | E27/32×30 с косым рантом |
| 235 | 155 | 28 | 35 | 2860 К | E40/45 с косым ран- том |

ник А в сочетании с жидкостным или стеклянным светофильтрами, предусмотренными в ГОСТ 7721—76.

Источник D_{65} воспроизводит условия освещения усредненным дневным светом и предназначен для измерения цвета люминесцирующих образцов. Рекомендаций по воспроизведению источника D_{65} ГОСТ 7721—76 не содержит.

Газоразрядные источники. Широкий диапазон применения газоразрядных источников, несмотря на сравнительно громоздкие системы электрического питания, обусловлен тем, что они интенсивно излучают в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра, имеют большой срок службы и высокий коэффициент полезного действия. Принцип их действия основан на явлении электролюминесценции, которая возникает при столкновениях электронов и ионов в процессе движения их в электрическом поле, при этом процесс перехода различных видов энергии в энергию излучения не подчиняется законам теплового излучения.

Дуговые разрядные лампы (табл. 7) имеют типовую конструкцию: в колбу, заполненную газом или парами металлов, помещены два основных электрода и поджигающий электрод.

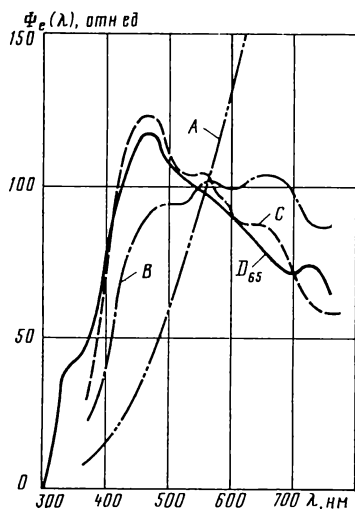


Рис. 15. Спектральная плотность потока излучения источников для цветовых измерений

Характеристики некоторых газоразрядных ламп

| Тип лампы | Напря- жение, В | Мощ- ность, Вт | Яркость, кд/м ² | Размеры колбы, мм | | Срок службы, ч | Напол- нение |
|-------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|------------|----------------------|--------------------|
| | | | | Диа- метр | Дли- на | | |
| ДРШ 250—3 | 72 | 250 | 0,1 | 40 | 145 | 500 | Ртуть |
| ДРШ 500М | 76 | 500 | 0,13 | 45 | 190 | 600 | |
| ДРТ 375 | 120 | 375 | — | 22 | 265 | 2500 | |
| ДРЛ 250 (6) | 130 | 250 | — | 91 | 227 | 10000 | |
| ДКсР 3000М | 33 | 3000 | 0,75 | 80 | 235 | 300 | Ксенон |
| ДНаС 18 | 22 | 18 | 0,02 | 33 | 165 | 200 | Натрий |
| ДРС 50 | 55 | 50 | 1,0 | 33 | 165 | 300 | Ртуть |
| ДУ 1 | 220 | 33 | 57 | 80 | 285 | 200 | Дейтерий |
| ДНУ 170 | 220 | 3 | 140 | 60 | 210 | 200 | Дейтерий и неон |

Между основными электродами происходит рабочий разряд. Колбы ламп изготавливают из кварцевого стекла, прозрачного в ультрафиолетовой области спектра.

В лампах с ртутным наполнением давление паров ртути сильно влияет на спектральный состав и интенсивность излучения. В измерительных приборах в основном используются лампы высокого и сверхвысокого давления. Лампы сверхвысокого давления типа ДРШ дают линейчатый спектр с фоном сплошного спектра (рис. 16). Спектр ламп высокого давления смещается в ультрафиолетовую область. Например, лампа ДРТ 375 дает линейчатый

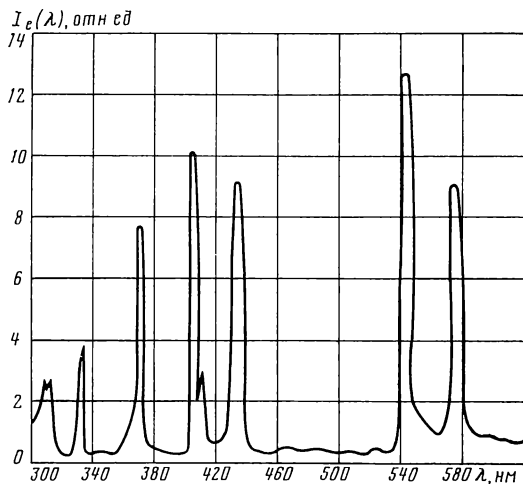


Рис. 16. Спектральная плотность силы излучения лампы ДРШ 500

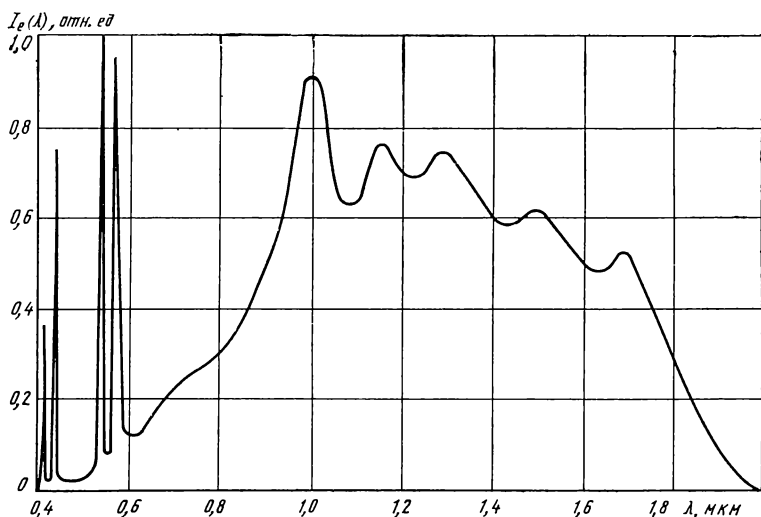


Рис. 17. Спектральная плотность силы излучения ртутных ламп типа ДРЛ

спектр в диапазоне $\lambda = 248 \dots 579$ нм, причем наиболее интенсивная линия спектра приходится на $\lambda = 365$ нм. Ртутные лампы высокого давления общего назначения ДРЛ (ГОСТ 16354—77) имеют вольфрамовую спираль и колбу, покрытую с внутренней стороны люминофором. Спектр излучения ламп ДРЛ смешанный (рис. 17). Ртутные лампы могут работать при значении температуры окружающей среды 25°C и в большинстве не требуют охлаждения. Недостатки ртутных ламп: высокое напряжение поджига и необходимость охлаждения ламп перед повторным включением.

Спектр излучения ксеноновых ламп близок к спектру излучения Солнца (рис. 18), и их часто применяют в качестве имитаторов излучения Солнца. Ксеноновые лампы требуют охлаждения. Кроме того, через 15 ... 20 ч после начала эксплуатации на внутренней стенке колбы появляется налет, заметно снижающий поток излучения, особенно в коротковолновой области спектра.

Среди дуговых газоразрядных ламп имеются лампы с линейчатыми спектрами излучения, их называют спектральными. Например, лампа ДНас 18 дает близко расположенные спектральные линии на длинах волн $\lambda = 589$ и $\lambda = 589,6$ нм, а ДРС 50 дает спектр из отдельных линий, лежащих в диапазоне $\lambda = 253,7 \dots 577$ нм. Такие лампы применяются в рефрактометрах и интерферометрах.

Для получения интенсивного излучения в ультрафиолетовой области используют дуговые дейтериевые ДУ и дейтерий-неоновые лампы ДНУ. Спектр излучения таких ламп сплошной (рис. 19).

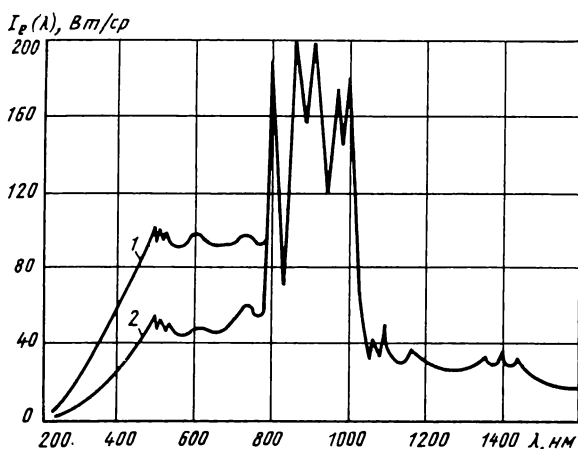


Рис. 18. Спектральная плотность силы излучения лампы ДКСР 3000:

1 — в начале эксплуатации;
2 — после 75 ч работы

Дейтерий-неоновая лампа более экономична и имеет меньшие габаритные размеры. В колбах ламп имеются окна из увиолевого стекла, прозрачного в ультрафиолетовой области.

Гейслеровские разрядные трубки низкого давления применяются в рефрактометрии, спектрометрии и поляризационных исследованиях. В трубках имеется сужение (капилляр), в котором создается ток большой плотности, что обуславливает их интенсивное свечение. В целях повышения прочности трубок и расширения диапазона спектральных характеристик капилляр и электроды помещены в толстостенную колбу со специальным держателем. Для получения спектральных линий ультрафиолетовой области капилляр и колба изготавливаются из увиолевого стекла, для инфракрасной области применяется окно из искусственного сапфира. Энергетические яркости наиболее интенсивных спектральных линий новых гейслеровских трубок даны в табл. 8 (в скобках указана энергетическая яркость трубок с окнами из сапфира).

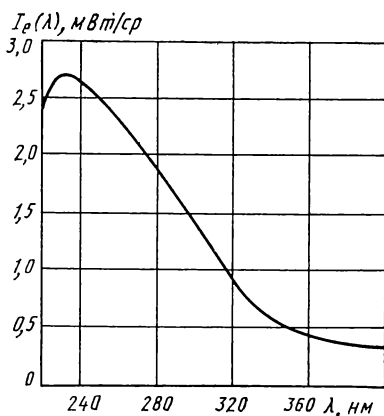


Рис. 19. Спектральная плотность силы излучения ламп ДУ 1 и ДНУ 170

Импульсные газоразрядные лампы используются в тех случаях, когда необходимо создать интенсивный модулированный поток излучения. На электрод лампы подается импульс высокого напряжения, после чего происходит разряд конденсатора и свечение прекращается. Интенсивность излучения и длительность импульса зависят от напряжения на конденсаторе в системе питания лампы и его емкости. Длительность

Интенсивные спектральные линии излучения гейслеровских трубок

| Наполнение | Длина волны, нм | Энергетическая яркость, Вт/(ср·м²) | Наполнение | Длина волны, нм | Энергетическая яркость, Вт/(ср·м²) |
|------------|-----------------|------------------------------------|------------|-----------------|------------------------------------|
| Гелий | 388,8 | 29 | Аргон | 763,5 | 23 |
| | 587,5 | 60 | | 800,6/801,4 | 37 |
| | 706,5 | 100 | | 840,8/842,4 | 42 |
| | 1083 | 430 | | 922,2 | 39 |
| Неон | | | | 965,7 | 21 |
| | 585,2 | 53 | Ртуть | 313,1 | 74 (96) |
| | 614,3/616,3 | 64 | | 366,2/366,3 | 60 (58) |
| | 638,2/640,2 | 100 | | 404,6 | 44 (37) |
| | 650 | 62 | | 435,8 | 100 (76) |
| | 659,8 | 58 | | 546 | 110 (110) |
| | 667,8 | 100 | | 1014 | 34 (30) |
| | 692,9 | 70 | | | |
| | 702,4/703,2 | 110 | | | |
| | 865 | 29 | | | |

импульсов для различных ламп измеряется от единиц до сотен миллисекунд, энергия излучения достигает десятков тысяч джоулей. Некоторые дуговые газоразрядные лампы можно также использовать в импульсном режиме. Например, газоразрядная лампа ДРШ 250—3 формирует импульсы с энергией 4 Дж длительностью 20 мс, которые накладываются на непрерывное излучение. Импульсный режим работы возможен также для лампы ДКсШ 200—2, причем энергия вспышки достигает 80 Дж.

Плазменные стандарты яркости (табл. 9) применяются в спектроскопии в качестве калибровочных источников излучения. Они имеют высокую интенсивность излучения и независимость характеристик от длительности работы. Свечение происходит в результате импульсного разряда внутри капилляра с испаряемой стенкой. Одной из основных характеристик таких источников является яркостная температура, по которой определяется спектральная интенсивность излучения для любой длины волны в пре-

Т а б л и ц а 9

Характеристики плазменных стандартов яркости

| Тип источника | Рабочая область спектра, мкм | Яркостная температура, К | Длительность вспышки, мс |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ЭВ-45 | 0,2 ... 1 | 40 000 | 100; 200; 300 |
| Импульс-5 | 0,2 ... 1 | 40 000 | 20 |
| СП-171 | 0,075 ... 0,6 | 37 000 | 3,5 |
| Стандарт яркости для ИК-области | 2 ... 6 | 31 000 | 100; 200; 300 |

делах рабочей области спектра. Яркостная температура источника эквивалентна температуре абсолютно черного тела, спектр излучения которого описывается формулой Планка.

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В измерительных приборах в основном применяют три способа регистрации результатов измерений: визуальный, фотографический и фотоэлектрический. К основным видам приемников излучения, используемых в оптических измерениях, относятся: глаз, фотоматериалы, тепловые и фотонные приемники. Выбор приемника в значительной степени определяется спектральным диапазоном рабочего потока излучения, а также другими его параметрами и характеристиками, от которых зависят работоспособность и точность измерительного прибора. К таким характеристикам относятся: постоянная времени — время с начала их облучения до момента, когда выходной сигнал достигнет определенной части максимального значения; порог чувствительности — минимальный поток излучения, который можно обнаружить приемником; интегральная и спектральная чувствительности.

При выборе приемника важное значение имеют его конструкция и условия эксплуатации. Приемники могут быть одноэлементные и многоэлементные, охлаждаемые и неохлаждаемые. Устройство некоторых приемников таково, что с их помощью возможно не только фиксировать значение падающего потока излучения, но и определять координаты источника излучения. Приемники такого типа называются координатными.

Вид сигнала, в который приемник преобразует поток излучения, оказывает существенное влияние на выбор способа обработки информации, полученной в процессе измерений. При визуальной регистрации на результат измерений влияют опыт и внимательность наблюдателя. Фотоматериалы позволяют зафиксировать и сохранить информацию о временных изменениях измеряемого объекта. Выходным сигналом тепловых и фотонных приемников излучения является электрический сигнал, который удобно использовать в автоматизированных средствах измерения, а также вводить в ЭВМ.

Глаз. Практически во всех измерениях участвует глаз, выполняя основную или вспомогательную функцию, причем его свойства значительно влияют на точность измерений. Глаз можно считать прибором, состоящим из приемника излучения и оптической системы с переменными фокусным расстоянием и входным зрачком. Оптическая система глаза образует на сетчатке изображение наблюдаемых предметов.

Свойство глаза резко видеть различно удаленные предметы называется аккомодацией. При аккомодации происходит деформация хрусталика, вызывающая изменение его фокусного расстоя-

яния. При спокойном состоянии хрусталика нормальный глаз аккомодирован на бесконечность. При аккомодации глаза на бесконечность утомление минимально, поэтому во всех визуальных измерительных приборах сетки и шкалы помещены в передней фокальной плоскости окуляра. Для рассмотрения мелких деталей предметов без дополнительной оптической системы их следует размещать на расстоянии 250 ... 300 мм, которое называется расстоянием наилучшего видения. В этом случае утомление наблюдателя будет незначительным. Для нормального глаза объем аккомодации составляет приблизительно 11 дптр, с возрастом он уменьшается до 2,5 дптр. Острота аккомодации глаза определяется расстоянием, в пределах которого глаз достаточно резко видит разноудаленные предметы. При диаметре зрачка 2 мм острота аккомодации составляет $\pm 0,25$ дптр. Угол обзора глаза по вертикали 125° и по горизонтали 150° , однако резкое изображение обеспечивается только в пределах $6 \dots 8^\circ$. За счет подвижности глаза происходит быстрый перевод зоны резкого видения с одной части наблюдаемого объекта на другую.

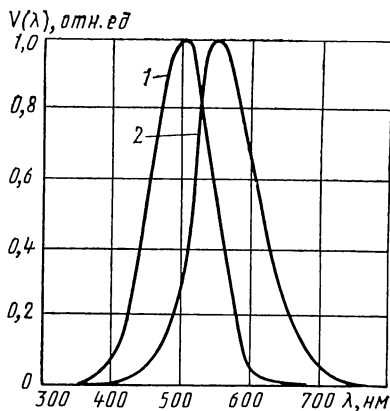


Рис. 20. Спектральная световая эффективность глаза:

1 — в сумерках; 2 — при дневном освещении

Глаз реагирует на излучение только видимого диапазона длин волн. Наименьшая яркость, вызывающая зрительное ощущение, составляет $2 \cdot 10^{-7}$ кд/м² и называется абсолютным порогом яркости глаза; при этом на зрачке глаза создается освещенность порядка $2 \cdot 10^{-14}$ лк. Диаметр зрачка глаза изменяется в пределах 2 ... 8 мм, регулируя освещенность на сетчатке. Способность глаза приспосабливаться к условиям освещенности называется адаптацией. Однако адаптация не безгранична: яркость свыше $2 \cdot 10^5$ кд/м² может вызвать ослепление.

После прекращения светового воздействия зрительные образы сохраняются в памяти в течение 0,05 ... 0,2 с. Поэтому глаз нормально воспринимает периодические световые раздражения при определенных соотношениях частоты мелькания изображения и освещенности основного фона. Например, при частоте мелькания 10 Гц достаточна освещенность порядка 10^{-1} лк, а при 40 Гц необходима освещенность 100 лк.

После прекращения светового воздействия зрительные образы сохраняются в памяти в течение 0,05 ... 0,2 с. Поэтому глаз нормально воспринимает периодические световые раздражения при определенных соотношениях частоты мелькания изображения и освещенности основного фона. Например, при частоте мелькания 10 Гц достаточна освещенность порядка 10^{-1} лк, а при 40 Гц необходима освещенность 100 лк.

Контрастная чувствительность глаза максимальна, если предмет наблюдается на фоне, яркость которого находится в пределах 130 ... 640 кд/м². При этом глаз обнаруживает предмет, если разность яркости фона и предмета составляет не ниже 1 ... 2 % яркости фона. Спектральная чувствительность глаза (рис. 20)

характеризуется относительной спектральной световой эффективностью $V(\lambda) = K(\lambda)/K_m$, где $K(\lambda)$ — значение спектральной световой эффективности для излучения с определенной длиной волны, а K_m — максимальная световая эффективность, соответствующая $\lambda = 555$ нм ($K_m \approx 680$ лм/Вт).

Разрешающая способность глаза зависит от спектрального состава излучения, яркости фона, формы и контраста предмета, а также углового поля при наблюдении. Так, максимальная разрешающая способность достигается при освещении монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 555$ нм. При точных измерениях в приборах создают условия для обеспечения максимальных значений контрастной чувствительности и разрешающей способности: освещение осуществляется зеленым, желто-зеленым или белым светом, предмет и отсчетные шкалы помещаются на одной прямой линии, в шкалах используется нониусное или бисекторное совмещение штрихов.

При наблюдении двумя глазами обеспечивается стереоскопическое восприятие, при котором наблюдатель ощущает разную удаленность предметных точек вследствие различного местоположения изображений в правом и левом глазах. Предел стереоскопического восприятия для опытного наблюдателя составляет $10''$.

Экспериментально установлено, что при фотометрических исследованиях глаз может быть использован как высокоточный приемник, фиксирующий равенство освещенностей, изображений, созданных с помощью двух источников, излучающих в одном и том же спектральном диапазоне. Погрешность уравнивания освещенностей при визуальном наблюдении не превышает $1 \dots 2 \%$.

При использовании глаза в качестве приемника излучения видимого диапазона следует учитывать, что ультрафиолетовое и инфракрасное излучения могут оказать на глаз вредное воздействие. Длительное восприятие ультрафиолетового излучения с $\lambda < 313$ нм может привести к воспалению роговицы, а излучение с $\lambda > 313$ нм вызывает флюоресценцию хрусталика. Инфракрасное излучение с $\lambda = 800 \dots 1350$ нм поглощается сетчаткой, которая при этом нагревается. При длительном воздействии нагрев вреден.

Фотоматериалы. Галогенидосеребряные светочувствительные слои фотоматериалов являются приемниками одноразового употребления. В оптических измерениях фотоматериалы применяются для фиксации изображений объектов, теневых и интерференционных картин и т. п. Эти изображения либо непосредственно являются аттестационным документом измеряемого объекта, либо подвергаются денситометрической обработке. Существуют также фотокомплекты для фиксации изображений, построенных на экране осциллографа. При выборе фотоматериала основное внимание уделяют диапазону спектральной чувствительности, общей светочувствительности, разрешающей способности, функции передачи модуляции и конструктивному оформлению фотомате-

Характеристики наиболее употребительных фотоматериалов

| Фотоматериал | Граница спектральной чувствительности, нм | Светочувствительность, ед. ГОСТа | Разрешающая способность, мм ⁻¹ |
|-----------------|---|----------------------------------|---|
| Пленки | | | |
| Микрат-300 | 640 | — | 500 |
| Микрат-900 | 640 | 0,008 | 1500 |
| ФПГ-В | 700 | 0,1 | 3000 |
| Пластины | | | |
| Кодак-649F | 700 | 0,007 | 3000 |
| Микрат LP-1 | 700 | — | 2000 |
| Микрат ВРЛ | 640 | 0,02 | 2800 |

риала. Характеристики некоторых фотоматериалов даны в табл. 10, на рис. 21 показаны функции передачи модуляции.

Светочувствительным элементом большинства современных фотоматериалов являются микрокристаллы галогенидов серебра, размеры которых не превышают 5 мкм. Кристаллы равномерно распределены в коллоидном растворе. Полученная фотоэмульсия наносится на основу, покрытую соединительным слоем. Сверху фотослой покрывается защитным слоем. Основа фото- и кинопленок изготавливается из триацетата целлюлозы, лавсана и других полимерных материалов. Фотопластинки имеют стеклянную основу. Для предотвращения образования ореолов вследствие отражения света нижнюю поверхность основы окрашивают, тем самым увеличивая ее оптическую плотность. Кроме того, противоареольную функцию выполняет и соединительный слой.

По спектральной чувствительности фотоэмульсии делят на следующие типы:

несенсибилизированные, граница чувствительности на длине волны $\lambda_{гр} = 510$ нм;

ортохром, $\lambda_{гр} = 590$ нм, провал чувствительности в диапазоне $\lambda = 480 \dots 530$ нм;

изоортохром, $\lambda_{гр} = 590$ нм, одинаковая чувствительность в диапазоне $\lambda = 400 \dots 590$ нм;

панхром, $\lambda_{гр} = 700$ нм, провал в сине-зеленой части спектра;

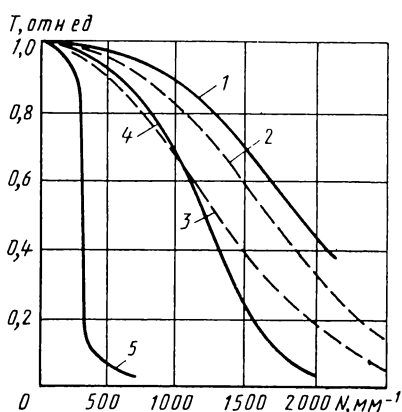


Рис. 21. Функции передачи модуляции некоторых фотоматериалов:

1 — ФПГ-В; 2 — Кодак-649F; 3 — Микрат LP-1; 4 — Микрат-900; 5 — Микрат-300

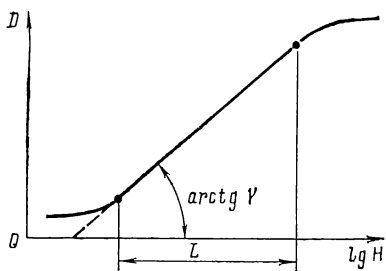


Рис. 22. Характеристическая кривая негативного фотоматериала:

D — оптическая плотность почернения; H — экспозиция; γ — коэффициент контрастности

изопанхром, $\lambda_{гр} = 700$ нм, одинаковая чувствительность в диапазоне $\lambda = 400 \dots 700$ нм;

изохром, $\lambda_{гр} = 640$ нм, одинаковая чувствительность в диапазоне $\lambda = 400 \dots 640$ нм;

инфрахром, чувствительна в диапазоне $\lambda = 650 \dots 1150$ нм.

Фотоматериалы для фиксирования цветных изображений состоят из нескольких эмульсионных слоев, различных по спектральной чувствительности. На каждом из слоев получается изображение, построенное лучами определенной части спектра.

Недостатками фотоматериала как приемника излучения являются необходимость проявления для преобразования скрытого изображения в видимое, а также нелинейность его характеристической кривой (рис. 22). Для достоверной фотографической регистрации результатов измерений следует ограничить интервал экспозиций значением L , называемым фотографической шириной и соответствующим прямолинейному участку характеристической кривой. Это ограничение сужает допустимый диапазон возможных яркостей объекта фотографирования.

Тепловые приемники. К тепловым приемникам (табл. 11) относятся термоэлементы, болометры, пирозлектрические и оптико-акустические приемники, причем последние ввиду сложности их изготовления и эксплуатации применяются только в длинноволновой инфракрасной области спектра. Чувствительность тепловых приемников практически постоянна в широком диапазоне длин волн видимой и инфракрасной областей спектра. Тепловые приемники обычно применяются при фотометрических измерениях, в частности, пироприемники используются для измерения энергии и мощности излучения лазеров. Линейки пироприемников применяются в спектральных приборах.

Чувствительным элементом теплового приемника, преобразующего энергию излучения в тепловую энергию, является вещество, поглощающее излучение (поглотитель). В идеальном случае поглотитель должен иметь коэффициент поглощения, равный единице. Поглотители бывают твердотельные и жидкостные, причем чаще применяются первые. Твердотельные поглотители обычно чернятся и изготавливаются в виде полостей, в которых обеспечивается многократное отражение излучения. Поскольку для приемников важно, чтобы постоянная времени была минимальной, поглотители изготавливают из материалов с хорошей теплопроводностью. Такими материалами являются серебро, медь, алюминий, висмут, никель, золото, константан, а также некоторые полу-

Характеристики тепловых приемников излучения

| Тип приемника | Размеры чувствительной площадки, мм | Постоянная времени, мс | Порог чувствительности (пороговый поток), 10^7 Вт | Интегральная чувствительность, В/Вт |
|--|-------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| Термоэлементы | | | | |
| ТП 0,3×3 | 0,3×3 | 40 | $3,4 \cdot 10^{-4}$ | 24 |
| ФТ 19 | 0,2×2 | 10 | $3,4 \cdot 10^{-4}$ | 18 |
| ТК 3×1,5 | 3×1,5 | 70 | 10^{-3} | 1 ... 4 |
| Термоэлемент Шварца | 2×0,2 | 23 | $3,5 \cdot 10^{-4}$ | 17 |
| Металлические болометры | | | | |
| БВЦ 0,3×3 | 0,3×3 | — | $6 \cdot 10^{-4}$ | 25 |
| БВЦ 0,2×2 | 0,2×2 | — | $2 \cdot 10^{-3}$ | 20 |
| БМ 6 | 1,9×0,4 | 25 | $< 10^{-3}$ | 25 |
| Полупроводниковые болометры | | | | |
| БКМ 5-1×1 | 1×1 | 4 | $5 \cdot 10^{-2}$ | 100 |
| БКМ 4 | 0,9×1,8 | 5,6 | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | 124 |
| Болометр сверхпроводящий (Sn), $T = 3,8$ К | 3 | 10 | 10^{-5} | 230 |
| Пирозлектрические приемники | | | | |
| На основе BaTiO_3 | 1 ... 20 | $(1 \dots 20) \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ | 100 |
| ЛПП 1 | 2 | — | 1 | — |
| ППЭ 1 | 3×3 | — | 10^{-1} | — |

проводниковые материалы, например сурьма, кремний, теллур, германий, селен.

Термоэлементы состоят из двух проволок, спаянных на одном конце. Принцип их действия основан на возникновении электродвижущей силы в цепи, состоящей из двух разнородных материалов, при нагревании места их спая. К месту спая присоединен поглотитель в виде черной фольги. Свободные концы проволок присоединены к массивному держателю, который обеспечивает постоянство значений их температуры. Термоэлементы бывают некомпенсированные — зависящие от значений температуры окружающей среды — и компенсированные — независимые от значений температуры, так как в них два одинаковых спая (рабочий и опорный) включены навстречу один другому. Опорный спай не подвергается воздействию излучения. Система из множества (иногда нескольких сотен или тысяч) последовательно соединенных спаев образует термоэлектрическую батарею, которую в совокупности с поглотителем в виде полости или пластины применяют в калориметрах.

Термоэлементы не требуют источника питания, реагируют как на постоянный, так и на модулированный поток излучения, неселективны, при небольших изменениях значений температуры термоэлектродвижущая сила изменяется по линейному закону. Порог чувствительности термоэлементов лежит в пределах потоков излучения $10^{-11} \dots 10^{-8}$ Вт. К недостаткам термоэлементов следует отнести большие значения постоянной времени: от сотых долей секунды до целых секунд. Для уменьшения постоянной времени поглотитель термоэлементов делают тонким и с малой площадью.

Болометры содержат токопроводящий поглотитель, сопротивление которого изменяется при его нагревании в процессе облучения. Для исключения влияния изменения температуры окружающей среды на выходной сигнал опорный и рабочий болометры включают в плечи мостовой схемы. При одинаковой температуре обоих болометров электрическая проводимость плеч одинакова, и ток в диагонали моста отсутствует. При облучении рабочего болометра равновесие моста нарушается, и в диагонали моста возникает ток, пропорциональный изменению температуры поглотителя.

Поглотители болометров могут быть выполнены в виде двух тонких слоев (поглощающего и токопроводящего), нанесенных с двух сторон на тонкую подложку. Толщина поглощающего слоя составляет 20 ... 30 мкм, токопроводящего — приблизительно 1 мкм. Болометр часто помещают в стеклянный вакуумированный баллон с окном из материала, прозрачного в определенной области спектра. Постоянная времени болометров обычно равна 1 ... 50 мс и может быть уменьшена до 0,1 мс охлаждением болометра.

Болометры, выходной сигнал которых не зависит от направления плоскости поляризации излучения, имеют поглотитель в виде двух перпендикулярных решеток с периодом ~ 1 мм из платиновой проволоки диаметром 3,8 мкм. Постоянная времени такого поглотителя составляет не более 1 мс, при этом поперечный размер решетки может достигать 100 мм.

Порог чувствительности болометров находится в тех же пределах, что и у термоэлементов, селективность определяется границами пропускания входного окна баллона. Недостаток болометров заключается в неодинаковой чувствительности в разных точках приемной площадки.

Пироэлектрические приемники действуют на основе изменения поляризации кристалла при его нагреве, вызванном поглощением энергии излучения. Изменение поляризации приводит к возникновению разности потенциалов на двух противоположных сторонах кристалла. Простейшая модель пироприемника состоит из пироактивного материала с двумя электродами, к которым присоединен усилитель электрического сигнала. При отсутствии излучения пироактивный материал имеет постоянную спонтанную поляризацию и разность потенциалов на электродах равна нулю. Падающее излучение вызывает нагрев пироактивного материала,

вследствие чего его спонтанная поляризация уменьшается, появляются свободные носители зарядов, которые образуют ток, сила которого определяется соотношением

$$i = Q\gamma d (\Delta T)/d t,$$

где Q — площадь поверхности поглотителя; γ — пирозлектрический коэффициент; ΔT — изменение значения температуры в процессе поглощения излучения; t — время действия излучения.

Пирозлектрические приемники одинаково чувствительны практически во всем оптическом диапазоне длин волн. Граница их чувствительности в инфракрасной области находится на длине волны 300 мкм.

Преимущества пироприемников: малая постоянная времени ($10^{-5} \dots 10^{-8}$ с), большой диапазон принимаемых энергий ($10^{-8} \dots 10$ Дж), высокая чувствительность. Кроме того, они не требуют сложных электрических систем, охлаждения, стабильны и надежны в эксплуатации, параметры систем с пироприемниками легко поддаются регулировке.

Фотонные приемники. Они основаны на использовании внешнего и внутреннего фотоэффекта. Внешним фотоэффектом называется испускание электронов с поверхности fotocувствительного слоя под действием падающего потока излучения. С момента поглощения кванта до испускания электрона проходит меньше 10^{-12} с, поэтому приемники на основе внешнего фотоэффекта являются быстродействующими.

Внутренний фотоэффект заключается в том, что некоторые вещества под действием поглощенной энергии излучения изменяют свою проводимость за счет перехода части электронов в свободное состояние. Свободные электроны начинают участвовать в переносе зарядов, при этом проводимость вещества увеличивается значительно больше, чем при его нагреве. Фотоэффект зависит от вещества и длины волны падающего излучения, поэтому фотонные приемники селективны.

В ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра (до $\lambda = 1,2$ мкм) применяются приемники с внешним фотоэффектом. Приемники с внутренним фотоэффектом мало эффективны в ультрафиолетовой и видимой областях, но их верхняя граница чувствительности смещена в более длинноволновую часть инфракрасного диапазона.

Из приемников, действующих на основе внешнего фотоэффекта, наибольшее применение в фотометрии и колориметрии находят фотоэлектронные умножители и фотоэлементы. Они предназначены в основном для видимого диапазона длин волн. Промышленность выпускает такие приемники большой номенклатуры с различными характеристиками (табл. 12). Основные параметры указанных приемников предусмотрены ГОСТ 17485—77 и 17470—77.

Фотоэлементы состоят из фотокатода и анода, размещенных внутри колбы, причем катод, как правило, нанесен на внутреннюю

Характеристики фотонных приемников с внешним фотоэффектом

| Приемник | Фотокатод | Размер (площадь) фотокатода, мм (мм²) | Диапазон спектральной чувствительности, нм | Область максимальной спектральной чувствительности, нм | Интегральная чувствительность, мкА/лм | Сила светового тока, А | Размеры колбы, мм | |
|----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|------------------------|-------------------|-------|
| | | | | | | | Диаметр | Длина |
| Фотоэлементы | | | | | | | | |
| Ф-1 с увиолевым окном | Cs ₃ Sb | 300 | 200 ... 650 | 270 ... 430 | 100 | 10 ⁻¹⁴ | 40 | 104 |
| Ф-10 | Na ₂ KSb(Cs) | 2800 | 300 ... 850 | 380 ... 480 | 160 | 10 ⁻¹³ | 62 | 100 |
| СЦБ-4 | Cs ₃ Sb(O) | 1100 | 350 ... 700 | 400 ... 500 | 80 | 10 ⁻⁷ | 39,5 | 129 |
| ЦГ-3 газонаполненный | Ag—O—Cs | 570 | 400 ... 1200 | 650 ... 850 | 100 | 10 ⁻⁷ | 27 | 62 |
| Фотоэлектронные умножители | | | | | | | | |
| ФЭУ-15А | BiAgOCs | Ø 20 | 320 ... 750 | 440 ... 540 | 40 | 6·10 ⁻⁸ | 36 | 100 |
| ФЭУ-17А с увиолевым окном | Cs ₃ Sb | 16×5 | 320 ... 600 | 360 ... 420 | 35 | 10 ⁻¹⁰ | 48,5 | 181 |
| ФЭУ-22 | Ag—O—Cs | 16×5 | 400 ... 1000 | 650 ... 850 | 40 | 6·10 ⁻¹⁰ | 48,5 | 181 |
| ФЭУ-28 | Ag—O—Cs | Ø 25 | 400 ... 1100 | 650 ... 850 | 15 | 7·10 ⁻⁸ | 34 | 122 |
| ФЭУ-39А с кварцевым окном | Cs ₃ Sb(O) | Ø 34 | 160 ... 600 | 420 ... 460 | 25 | 3·10 ⁻¹⁰ | 48,5 | 178 |
| ФЭУ-79 | Na ₂ KSb(Cs) | Ø 6 | 300 ... 820 | 400 ... 440 | 200 | 2·10 ⁻⁹ | 48,5 | 175 |
| ФЭУ-84 | Na ₂ KSb(Cs) | Ø 25 | 300 ... 800 | 400 ... 480 | 130 | 3·10 ⁻⁸ | 34 | 105 |

поверхность колбы. Катод и анод имеют выводы на цоколь, внутри колбы — вакуум или газ. Вакуумные фотоэлементы имеют малую постоянную времени (приблизительно 10^{-9} с), газонаполненные — $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с. Фотоэлементы удобны в эксплуатации, срок их службы достигает 1000 ч. В измерительных устройствах одинаковые фотоэлементы можно включать попарно в дифференциальную схему, что дает возможность проводить сравнение значений двух сигналов. При регистрации слабых потоков излучения в выходную цепь фотоэлементов приходится включать усилители, которые значительно влияют на выходные характеристики всей системы. Лучшую стабильность в работе обеспечивают усилители переменного тока. Для их применения падающий поток излучения модулируется с помощью механических или электрооптических модуляторов, тогда на выходе фотоэлемента образуется переменный ток.

Фотоэлектронные умножители предназначены для регистрации слабых потоков излучения; они отличаются от фотоэлементов тем, что содержат дополнительные электроды (диноды), с которых происходит вторичная эмиссия. В результате слабый фототок усиливается внутри фотоумножителя, причем коэффициент усиления достигает 10^7 .

Постоянная времени фотоумножителей составляет $5 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-8}$ с, поэтому в быстродействующей или импульсной аппаратуре их применяют только при малых потоках излучения и отсутствии фоновой засветки. С учетом совокупности характеристик каждого из фотоумножителей для них рекомендованы определенные области применения. Например, ФЭУ-17А и ФЭУ-22 имеют фотокатоды, позволяющие фотометрировать излучение в узких пучках. Особо малые потоки излучения целесообразно измерять с помощью высокочувствительного ФЭУ-79. За пределами видимого диапазона длин волн используют ФЭУ-28 и ФЭУ-39А, регистрация лазерного излучения — основная область применения ФЭУ-84.

Диапазон спектральной чувствительности фотоэлементов и фотоумножителей определяется материалами фотокатода и колбы. Спектральные характеристики материалов фотокатодов показаны на рис. 23. Материал колбы аналогичен материалу колб ламп накаливания (см. рис. 14).

К приемникам с внутренним фотоэффектом относятся фотодиоды, фототранзисторы и фоторезисторы (табл. 13), причем «красная» граница спектральной чувствительности многих из них находится за пределами $\lambda = 1,2$ мкм.

Фотодиоды действуют на основе односторонней проводимости электронно-дырочного PN -перехода под воздействием излучения. На металлическую пластинку, которая служит одним из электродов, последовательно наносятся два слоя полупроводниковых материалов N - и P -типов. Сверху наносится тонкий полупрозрачный слой проводящего материала, выполняющий роль второго электрода. При облучении P -полупроводника его электроны переходят в возбужденное состояние и преодолевают сопротивле-

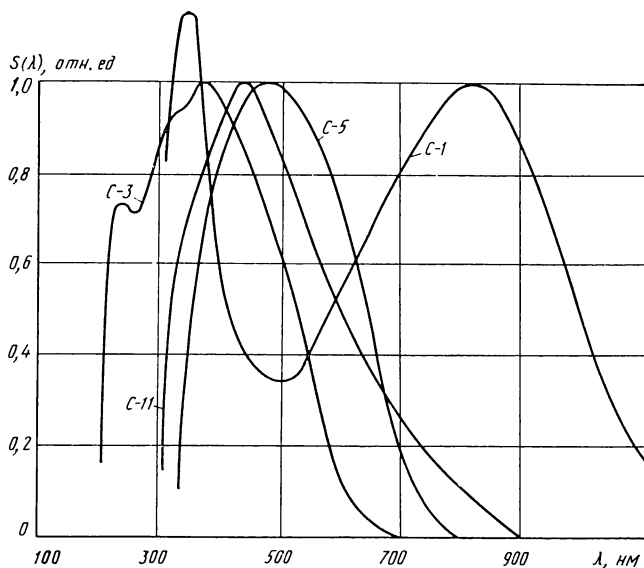


Рис. 23. Спектральные характеристики фотокатодов:

C-1 — кислородно-цезиевого Ag-O-Cs ; C-3 — сурьяно-цезиевого Cs_3Sb ; C-5 — висмута-серебряно-цезиевого BiAgOCs ; C-11 — многощелочного полупрозрачного $\text{Na}_2\text{KSb(Cs)}$

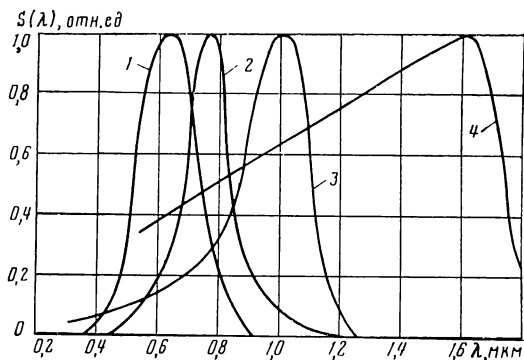
Т а б л и ц а 13

Характеристики фотонных приемников с внутренним фотоэффектом

| Приемник | Материал чувствительного слоя | Площадь чувствительной площадки, мм^2 | Диапазон спектральной чувствительности, нм | Длина волны при максимуме чувствительности, нм | Постоянная времени, с | Интегральная чувствительность, мА/лм | Сила темнового тока, А | Размеры приемника, мм |
|-------------------------------|-------------------------------|--|--|--|-----------------------|--|------------------------|--|
| Фотодиоды и фототриоды | | | | | | | | |
| ФД-1 | Ge | 5 | 400 ... 1900 | 1600 | 10^{-5} | 20 | 30 | $\varnothing 8,2 \times 10$ |
| ФД-7К | Si | — | 400 ... 1200 | 800 | 10^{-5} | 0,47 | 5 | — |
| ФД-3 | Ge | 3 | 400 ... 1900 | 1600 | 10^{-5} | 20 | 15 | $\varnothing 3,8 \times 60$ |
| ФТ-1 | Ge | — | 400 ... 1900 | 1600 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 170 ... 500 | 300 | $\varnothing 12 \times 47$ |
| Фоторезисторы | | | | | | Удельная чувствительность, $\text{мА/(лм} \cdot \text{В)}$ | | |
| ФС-К1 | CdS | 28 | 350 ... 900 | 640 | $2,5 \cdot 10^{-2}$ | 6 | 15 | $\varnothing 28 \times 5,5$ |
| ФС-7А | CdS | 200 | 350 ... 900 | 640 | — | 6 | 100 | $\varnothing 25 \times 2,5$ |
| ФС-Д0 | CdSe | 28 | 450 ... 1220 | 780 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 20 | 10 | $\varnothing 2 \times 8;$ $5 \times 16,5$ |

Рис. 24. Спектральные характеристики:

1 и 2 — фоторезисторов из CdS и CdSe; 3 и 4 — фотодиодов из Si и Ge



ние границы раздела полупроводников, образуя электрический ток.

Наибольшее применение находят кремниевые и германиевые фотодиоды, спектральные характеристики которых показаны на рис. 24. Например, кремниевый фотодиод ФД-7К используют для измерения энергии импульсов лазерного излучения, а германиевый ФД-57 — в фотометрии.

Фотодиоды могут работать без внешнего источника питания, тогда их называют фотогальваническими. При облучении фотогальванического приемника нарушается равновесие PN -перехода и возникает электрический ток, регистрируемый во внешней цепи.

Фотогальванические приемники координатного типа (инверсные фотодиоды) обладают боковым фотоэффектом, который заключается в том, что при облучении какого-либо участка чувствительной площадки, кроме первичного фототока, в PN -переходе, в P -области возникает боковой ток, который отводится через N -область. При попадании излучения в центр чувствительной площадки боковые токи проходят в N -области до электродов равные расстояния, тогда ток в цепи с боковой проводимостью отсутствует. При смещении зоны облучения от центра возникает разность потенциалов, которая в пределах определенного значения диаметра D_0 чувствительной площадки прямо пропорциональна значению смещения x (рис. 25).

Присоединив к чувствительной площадке две пары взаимно перпендикулярных электродов, получают приемник для определения координат в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Точность определения угловых координат точечного источника излучения при отсутствии фона оценивается значением $0,1''$. К недостаткам инверсных фотодиодов следует отнести то, что выходной сигнал зависит не только от координат излучателя, но и от значения потока излучения, поэтому в системах следует обеспечивать его стабильность.

Действующие с внешним источником питания приемники могут быть многоэлементными. Простейшим приемником такого типа является двухплощадочный фотодиод, каждая площадка которого представляет собой приемник, создающий собственный выходной сигнал.

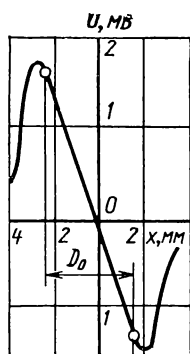


Рис. 25. Характеристика инверсного фотодиода

Площадки приемника включаются в мостовую схему, и при равенстве падающих на них потоков излучения ток в диагонали моста отсутствует. Если световое пятно в плоскости приемника несимметрично относительно линии раздела площадок, то в диагонали моста появляется ток. Характеристики таких приемников аналогичны характеристике, изображенной на рис. 25, поэтому такие приемники можно отнести к координатным и применять в фотоэлектрических измерительных устройствах, например, для контроля децентрировки

линз. К недостаткам таких приемников следует отнести необходимость уравнивания чувствительности всех элементов.

Фототранзисторы отличаются от фотодиодов дополнительным усилением фототока за счет двух переходов: PN и NP . Они состоят из монокристаллического полупроводника N -типа (базы) и двух PN -переходов (коллекторного и эмиттерного). Интегральная чувствительность фототранзисторов выше чувствительности фотодиодов; выходная характеристика линейна в широком диапазоне значений потоков излучения. Недостатки фототранзисторов: большая постоянная времени, температурная нестабильность параметров, неравномерность чувствительности приемной площадки и высокий порог чувствительности по сравнению с фотодиодами. Эти недостатки ограничивают область их применения, особенно в приборах для точных измерений.

Фоторезисторы — полупроводниковые приемники, в которых вследствие внутреннего фотоэффекта происходит изменение проводимости под действием излучения. Спектральная чувствительность фоторезисторов находится в диапазоне $\lambda = 0,15 \dots 40$ мкм. Недостатки фоторезисторов: существенная нелинейность выходной характеристики и необходимость охлаждения большинства таких приемников. Кроме того, при влажности окружающей среды свыше 80 % заметно ухудшается их чувствительность.

Неохлаждаемые сернисто-кадмиевые и селенисто-кадмиевые фоторезисторы (см. табл. 14) имеют достаточно линейные выходные характеристики и чувствительны в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (см. рис. 24). Поэтому их применяют в приборах для измерения линейных размеров. При изготовлении фоторезистора полупроводниковый материал наносят или наклеивают на диэлектрическую подложку, затем испарением в вакууме на него наносят полосы металла, к которым припаивают электроды. Для защиты от внешних воздействий чувствительную площадку покрывают прозрачным лаком. Фоторезисторы включают на вход усилителя, они требуют стабилизированного источника питания постоянного или переменного тока.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1. ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Наиболее распространенным материалом для изготовления оптических деталей является оптическое бесцветное неорганическое стекло (далее — стекло). В видимой и инфракрасной областях спектра показатель преломления стекла измеряют для длин волн, приведенных в табл. 14.

В ультрафиолетовой области спектра показатель преломления стекла измеряют для длины волны $\lambda = 0,365$ мкм (линия спектра i , химический элемент Hg).

Для видимой области спектра по измеренным значениям показателя преломления вычисляют коэффициент дисперсии

$$v_e = (n_e - 1)/(n_{F'} - n_{C'}),$$

где n_e , $n_{F'}$ и $n_{C'}$ — показатели преломления стекла для спектральных линий e , F' , C' .

В зависимости от расположения на координатном поле диаграммы «показатель преломления n_e — коэффициент дисперсии v_e »

Т а б л и ц а 14

Длины волн, линии спектра и химические элементы для измерения оптических характеристик стекла

| Видимая область | | | Инфракрасная область | |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Длина волн λ , мкм | Обозначение линии спектра | Химический элемент | Длина волны λ , мкм | Химический элемент |
| 0,40466 | h | Hg | 0,800 | — |
| 0,43583 | g | Hg | 0,863 | — |
| 0,48000 | F' | Cd | 0,900 | — |
| 0,48613 | F | H | 0,951 | — |
| 0,48800 | — | Ar | 1,000 | — |
| 0,54607 | e | Hg | 1,060 | Nd в стекле |
| 0,58756 | d | He | 1,1 | — |
| 0,58930 | D | Na | 1,153 | He + Ne |
| 0,6328 | — | He + Ne | От 1,2 до 2,6 через 0,1 | — |
| 0,6438 | C' | Cd | | |
| 0,65628 | C | H | | |
| 0,6943 | — | Cr + Al ₂ O ₃ | | |
| 0,700 | — | — | | |
| 0,70652 | r | He | | |

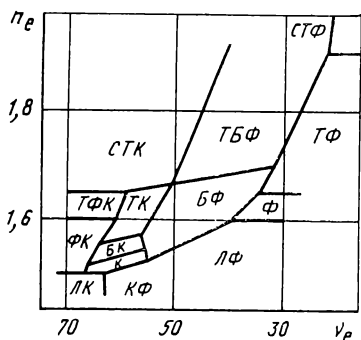


Рис. 26. Диаграмма расположения оптических стекол различных типов в зависимости от показателя преломления n_e и коэффициента дисперсии v_e

(рис. 26) типы оптических стекол получили следующие названия: ЛК — легкий крон; ФК — фосфатный крон; ТФК — тяжелый фосфатный крон; К — крон; БК — баритовый крон; ТК — тяжелый крон; СТК — сверхтяжелый крон; ОК — особый (с особым ходом дисперсии) крон; КФ — крон-флинт; БФ — баритовый флинт; ТБФ — тяжелый баритовый флинт; ЛФ — легкий флинт; Ф — флинт; ТФ — тяжелый флинт; СТФ — сверхтяжелый флинт; ОФ — особый (с особым ходом дисперсии) флинт. Стекла типов ОК и ОФ могут находиться на любом участке

поля диаграммы, занимаемом соответственно кронами или флинтами.

Условное обозначение стекла при записи в документации должно состоять из обозначений марки стекла и соответствующего стандарта, например ТБФ4 ГОСТ 3514—76.

Согласно ГОСТ 3514—76 оптические стекла изготавливают двух серий: обычные — с нумерацией марок от 1 до 99 и стекла серии 100 — малотемнеющие под действием ионизирующего излучения, с нумерацией марок от 100 до 199.

Для характеристики качества стекла, выпускаемого в заготовках размером (диаметром или с наибольшей стороной) не более 500 мм, его нормируют по следующим параметрам: показателю преломления n_e , средней дисперсии $n_F' - n_C'$, однородности партии заготовок по показателю преломления, однородности партии заготовок по средней дисперсии, оптической однородности, двойному лучепреломлению, радиационно-оптической устойчивости (стекла серии 100), показателю ослабления ϵ_d , бесшвильности и пузырьности.

Пропускание обычных кроновых стекол простирается в коротковолновую область спектра не далее 0,33 мкм. Еще менее прозрачны в этой области флинтовые стекла. Изготовленные в платиновых ваннах печах из особо чистых материалов стекла прозрачны до длины волны 0,29 мкм. Такие стекла называют увиолевыми. В еще более коротковолновой области спектра (до 0,185 мкм) используют плавный кварц. Кроме кварца, пригодны к использованию в ультрафиолетовой области спектра фтористый литий, фтористый кальций и фтористый магний.

В инфракрасной области спектра прозрачность кроновых и флинтовых стекол не простирается далее длин волн 3 ... 5 мкм. В этой области используют различные кристаллы, в основном выращенные искусственно. В области длин волн до 3 мкм исполь-

зуют кварц и обычные стекла, в области 3 ... 6 мкм — сапфир, германий, кремний, селен и др. В области длин волн 8 ... 13 мкм применяют кристаллы галогенов (лучшим из них является бромид-йодид таллия), а также сернисто-мышьяковые стекла.

Оптическое кварцевое стекло в настоящее время изготавливают блоками диаметром не более 1 м. Остальные перечисленные материалы для инфракрасной области спектра изготавливают блоками значительно меньших размеров.

Для изготовления астрономических зеркал в зависимости от диаметра зеркала используют обычное стекло, пирекс (специальное стекло с уменьшенным значением коэффициента линейного расширения), плавленый кварц, ситалл или легированный кварц. К астрономическому зеркалу предъявляют следующие основные требования: рабочая поверхность зеркала должна сохранять свою форму при больших перепадах значений температуры и ориентировки зеркала в пространстве; механические свойства материала должны быть стабильны во времени; материал должен легко поддаваться шлифованию и полированию. Этим требованиям в большей или меньшей степени удовлетворяет стеклокерамический материал, появившийся в 1950-х гг. В разных странах этот материал получил разные фирменные названия: ситалл — в СССР, пирокерам и сервит — в США, церодур — в ФРГ. Он состоит из кристаллов, размеры которых меньше длины волны света, поэтому очень мало рассеивает свет.

Еще в 1958 г. Н. Н. Михельсон [11] обратил внимание на возможность применения бериллия в качестве материала для астрономических зеркал. Благодаря малой плотности ($1,85 \text{ г/см}^3$) и большому модулю Юнга бериллий имеет явные преимущества перед многими другими материалами и весьма перспективен для применения в космических телескопах. К настоящему времени уже накоплен положительный опыт практического применения бериллия в космических телескопах, поэтому сейчас бериллию уделяется большое внимание конструкторов телескопов.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Наиболее распространенными методами измерения показателей преломления и дисперсии оптических материалов в видимой области спектра являются гониометрические, рефрактометрические и интерференционные. Эти методы обеспечивают необходимую в большинстве случаев точность измерений и используются для измерений с помощью серийно выпускаемых приборов.

ГОНИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Измерение показателей преломления на гониометре можно осуществить методом наименьшего отклонения, автоколлимационным методом, методом луча, нормально входящего в призму или нормально выходящего из призмы, и др.

Метод наименьшего отклонения. При измерениях по этому методу необходимо из исследуемого стекла изготовить двухгранную призму с преломляющим углом $\theta = 60^\circ$, если показатель преломления $n_D < 1,65$. Для $n_D = 1,65 \dots 1,75$ угол $\theta = 50^\circ$, для $n_D > 1,75$ угол $\theta = 40^\circ$. Допустимое отклонение преломляющего угла призмы от указанных значений составляет $\pm 2^\circ$. Обе действующие грани призмы должны быть отполированы с точностью $1/4$ интерференционной полосы (контроль осуществляется плоским пробным стеклом). Размеры призмы должны быть такими, чтобы возможно полнее использовался пучок лучей, выходящий из коллиматора гониометра. Рекомендуется изготавливать призмы с высотой не менее 10 мм.

Длина грани в направлении, параллельном главному сечению призмы, должна быть не менее 25 мм для $n_D < 1,7$; 30 мм для $n_D = 1,7 \dots 1,8$ и 35 мм для $n_D > 1,8$.

Сущность метода заключается в том, что призму устанавливают в особое положение по отношению к падающему на нее параллельному пучку лучей так, чтобы угол ε отклонения лучей призмой имел минимальное значение из всех возможных углов отклонения для данной призмы (рис. 27). В этом случае лучи внутри призмы идут перпендикулярно к биссектрисе преломляющего угла θ призмы, а показатель преломления n призмы связан с углами θ и ε зависимостью

$$n = \sin \left(\frac{\theta + \varepsilon}{2} \right) / \sin \frac{\theta}{2}. \quad (18)$$

Измерив на гониометре углы θ и ε , можно по формуле (18) вычислить показатель преломления призмы для выбранной длины волны.

Подготовка гониометра к работе заключается в том, чтобы коллиматор K и зрительная труба T были установлены на беско-

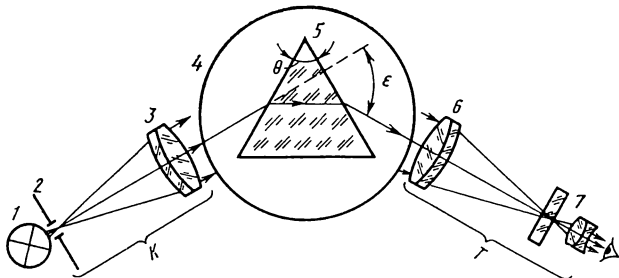


Рис. 27. Схема измерения показателя преломления на гониометре методом наименьшего отклонения

нечность, а визирные оси коллиматора и зрительной трубы расположены перпендикулярно оси вращения гониометра. Кроме того, щель 2 коллиматора, освещаемая источником 1, должна быть параллельна оси вращения гониометра. Способы обеспечения этих требований подробно изложены в инструкции по эксплуатации гониометра.

Преломляющий угол θ призмы 5 определяется с помощью автоколлимационной зрительной трубы Т, ось которой последовательно устанавливается перпендикулярно к граням призмы, образующим угол θ . Эти положения фиксируются в момент совмещения перекрестия сетки окуляра 7 зрительной трубы с автоколлимационным изображением этого же перекрестия. При этом снимаются отсчеты a_1 и a_2 по лимбу гониометра, а преломляющий угол определяется по формуле

$$\theta = 180^\circ - (a_1 - a_2).$$

Для измерения угла ϵ призму 5 устанавливают на столе 4 гониометра так, чтобы световые пучки, падающие на ее грани и преломляющиеся на них, занимали середины отверстий объектива 3 коллиматора и объектива 6 зрительной трубы. Далее столик с призмой поворачивают так, чтобы биссектриса ее преломляющего угла составляла с осью коллиматора острый угол, равный приблизительно 60° . Стол с призмой закрепляют в этом положении и поворачивают зрительную трубу к основанию призмы, пока не появится изображение щели 2 коллиматора. В этом положении зрительной трубы стол 4 с призмой поворачивают вокруг оси гониометра и следят за движением изображения щели 2.

Пройдя некоторое расстояние, изображение щели на мгновение останавливается в положении наименьшего отклонения, а затем начинает двигаться в обратном направлении. Закрепив столик с призмой в положении наименьшего отклонения, поворачивают зрительную трубу и совмещают ее перекрестие с изображением щели, после чего закрепляют зрительную трубу. Слегка поворачивая столик с призмой микрометрическим винтом вместе с отсчетным лимбом в ту и другую сторону, проверяют соответствие установки трубы углу наименьшего отклонения. Если при малых поворотах столика с призмой изображение щели несколько смещается с перекрестия в сторону преломляющего угла призмы, то, установив призму в положение, соответствующее крайнему положению изображения, исправляют установку зрительной трубы.

Точно совместив центр перекрестия с изображением щели в положении наименьшего отклонения, снимают первый отсчет. Затем поворачивают трубу при закрепленном отсчетном лимбе до тех пор, пока не появится прямое изображение щели, построенное без участия призмы, и снимают второй отсчет. Если призма полностью перекрывает все выходящие из коллиматора лучи, то ее убирают со стола гониометра. Разность полученных отсчетов

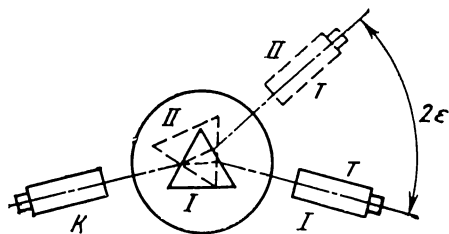


Рис. 28. Схема измерения удвоенного угла наименьшего отклонения

равна углу наименьшего отклонения ϵ для выбранной длины волны.

Для повышения точности измерений следует измерять удвоенный угол наименьшего отклонения, устанавливая призму и зрительную трубу T последовательно в симметричные положения I и II (рис. 28). Оба положения соответствуют наименьшему отклонению лучей призмой.

Рассмотрим влияние погрешностей измерения углов θ и ϵ на точность измерения показателя преломления n . Для этого сначала прологарифмируем формулу (18), а затем продифференцируем полученное выражение:

$$\ln n = \ln \sin \frac{\theta + \epsilon}{2} - \ln \sin \frac{\theta}{2};$$

$$dn = \frac{n}{2} \left[\operatorname{ctg} \frac{\theta + \epsilon}{2} (d\theta + d\epsilon) - \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \right]. \quad (19)$$

Используя формулу (7), найдем среднюю квадратическую погрешность σ_n в зависимости от средних квадратических погрешностей σ_θ и σ_ϵ :

$$\sigma_n = \frac{n}{2} \sqrt{(\sigma_\theta^2 + \sigma_\epsilon^2) \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta + \epsilon}{2} + \sigma_\theta^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2}}. \quad (20)$$

Так как углы θ и ϵ измеряют на одном и том же приборе приблизительно с одинаковой точностью, то можно положить $\sigma_\theta = \sigma_\epsilon$; в этом случае формула (20) примет вид

$$\sigma_n = \frac{n}{2} \sigma_\theta \sqrt{2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta + \epsilon}{2} + \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2}}. \quad (21)$$

Пример. Определить среднюю квадратическую погрешность измерения показателя преломления стекла марки Ф9 для длины волны $\lambda = 546,1$ нм. Номинальное значение показателя преломления $n = 1,61804$. Преломляющий угол призмы $\theta = 60^\circ$; измерения углов θ и ϵ выполнены на гониометре с погрешностями $\sigma_\theta = \sigma_\epsilon = 2'' = 1 \cdot 10^{-5}$ рад.

Из формулы (18) следует, что угол наименьшего отклонения $\epsilon = 48^\circ$. По формуле (21) вычисляем $\sigma_n = \pm 1,63 \cdot 10^{-5}$.

Профессор Г. В. Погарев предложил весьма простую и удобную для практики формулу для определения погрешности измерения показателя преломления:

$$\Delta n = 0,0002/l,$$

где l — длина основания призмы, мм.

Эта формула получена в предположении, что ни объектив коллиматора, ни объектив зрительной трубы не ограничивают световых пучков при измерениях углов θ и ϵ .

Автоколлимационный метод.

Метод основан на измерении преломляющего угла θ призмы, изготовленной из испытуемого стекла, а также угла ε , образованного нормалью к одной из ее граней и лучами, отраженными от другой ее грани. Если показатель преломления $n_D < 1,65$, преломляющий угол $\theta = 30^\circ$, если $n_D = 1,65 \dots 1,75$, угол $\theta = 25^\circ$; если $n_D > 1,75$, угол $\theta = 20^\circ$. Одна из рабочих граней призмы должна быть алюминирована или посеребрена.

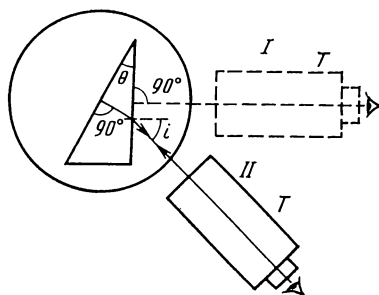


Рис. 29. Схема измерения показателя преломления на гониометре автоколлимационным методом

Призму устанавливают на стол гониометра (рис. 29) и выполняют измерения только с помощью автоколлимационной зрительной трубы T , устанавливая ее в два положения. В положении I ось трубы перпендикулярна к грани призмы, не имеющей зеркального покрытия, что фиксируется по совпадению автоколлимационного изображения перекрестия с самим перекрестием; снимают первый отсчет. Затем поворачивают зрительную трубу к основанию призмы (положение II) до получения автоколлимации от зеркальной грани; снимают второй отсчет. По разности двух отсчетов определяют угол i . Преломляющий угол θ призмы должен быть известен или измерен описанным выше способом. Показатель преломления вычисляют по формуле

$$n = \sin i / \sin \theta. \quad (22)$$

Для анализа точности метода используем аналогичный прием логарифмирования и последующего дифференцирования формулы (22). Перейдя к средним квадратическим погрешностям σ_n , σ_θ и σ_i , получим

$$\sigma_n = n \sqrt{\sigma_i^2 \operatorname{ctg}^2 i + \sigma_\theta^2 \operatorname{ctg}^2 \theta}. \quad (23)$$

Положив $\sigma_\theta = \sigma_i$, найдем

$$\sigma_n = n \sigma_\theta \sqrt{\operatorname{ctg}^2 i + \operatorname{ctg}^2 \theta}. \quad (24)$$

Пример. Используем данные предыдущего примера, приняв $n = 1,61804$; $\theta = 30^\circ$; $\sigma_\theta = \sigma_i = 2'' = 1 \cdot 10^{-5}$ рад. Применив формулы (22) и (24), найдем $i = 54^\circ$; $\sigma_n \approx 3 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, автоколлимационный метод в сопоставимых условиях измерения грубее метода наименьшего отклонения, но проще и оперативнее его.

Метод луча, нормально входящего в призму или нормально выходящего из нее. Измерения выполняют на гониометре с помощью коллиматора и зрительной трубы (рис. 30). Призма имеет такую же форму, как и в предыдущем способе. Сначала совмещают изображение щели коллиматора K с центром перекрестия зритель-

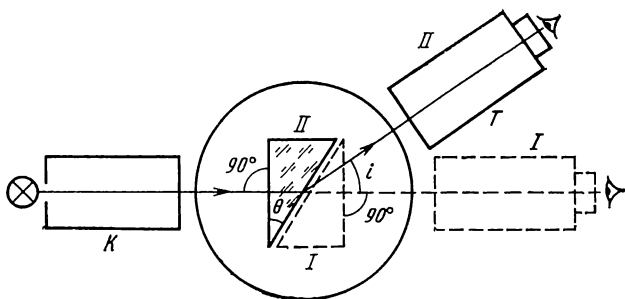


Рис. 30. Схема измерения показателя преломления на гониометре методом луча, нормально входящего в призму или нормально выходящего из нее

ной трубы T . Затем на стол гониометра устанавливают призму в положение I так, чтобы одна из ее граней была перпендикулярна к оси зрительной трубы (проверка по автоколлимации); снимают первый отсчет. Затем поворачивают столик с призмой точно на 180° , что обеспечивает нормальное падение лучей, вышедших из коллиматора, на другую грань призмы.

Далее поворачивают зрительную трубу к основанию призмы (положение II) до совмещения изображения щели с центром перекрестия; снимают второй отсчет. По разности двух отсчетов определяют угол i . Из закона преломления следует, что

$$n = \sin(\theta + i) / \sin \theta. \quad (25)$$

При измерениях методом луча, нормально выходящего из призмы, после установки зрительной трубы перпендикулярно к одной из граней призмы столик жестко соединяют со зрительной трубой и как одно целое поворачивают до совмещения изображения щели с центром перекрестия (в этом случае коллиматор и зрительная труба как бы меняются местами по сравнению с методом луча, нормально входящего в призму). Показатель преломления вычисляют по той же формуле (25).

Средняя квадратическая погрешность σ_n измерения показателя преломления этим методом

$$\sigma_n = n \sqrt{(\sigma_\theta^2 + \sigma_i^2) \operatorname{ctg}^2(\theta + i) + \sigma_\theta^2 \operatorname{ctg}^2 \theta}. \quad (26)$$

Приняв $\sigma_\theta = \sigma_i$, получим

$$\sigma_n = n \sigma_\theta \sqrt{2 \operatorname{ctg}^2(\theta + i) + \operatorname{ctg}^2 \theta}. \quad (27)$$

Пример. Воспользуемся данными предыдущего примера, положив $n = 1,61804$; $\theta = 30^\circ$; $\sigma_n = \sigma_i = 2'' = 1 \cdot 10^{-5}$ рад. По формулам (26) и (27) вычислим $i = 24^\circ$; $\sigma_n \approx 3,4 \cdot 10^{-5}$.

По измеренным значениям показателя преломления для различных длин волн можно рассчитать среднюю дисперсию, относительные частные дисперсии и коэффициент дисперсии. В тех

случаях, когда необходимо определить дисперсию для двух близких значений длин волн, можно использовать дифференциальный метод измерения дисперсии. Сущность его заключается в том, что в процессе измерения показателя преломления каким-либо гониометрическим методом непосредственно измеряют разность углов отклонения для двух близких значений длин волн. Результаты измерений подставляют в формулы, полученные дифференцированием основных формул (18), (22) и (25). Например, дифференцируя формулу (25), найдем

$$dn = \frac{\cos(\theta + i)}{\sin \theta} di. \quad (28)$$

Переходя от дифференциалов dn и di к соответствующим разностям для близких значений длин волн λ_1 и λ_2 , получим

$$n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} = \frac{\cos(\theta + i)}{\sin \theta} (i_{\lambda_1} - i_{\lambda_2}), \quad (29)$$

где значение угла i берут для любой длины волны в интервале от λ_1 до λ_2 (допущенная при этом погрешность оказывается ничтожно малой). На практике разность $i_{\lambda_1} - i_{\lambda_2}$ измеряется непосредственно как разность отсчетов двух положений зрительной трубы, перекрестие которой последовательно совмещают с изображениями щели коллиматора, построенными лучами соответствующих длин волн. Например, если длинам волн λ_1 и λ_2 соответствуют спектральные линии F' и C' , то перекрестие зрительной трубы наводят на изображения щели коллиматора, окрашенные в голубой и красный цвета (оба изображения одновременно видны в зрительную трубу). В этом случае частная дисперсия

$$n_{F'} - n_{C'} = \frac{\cos(\theta + i)}{\sin \theta} (i_{F'} - i_{C'}). \quad (30)$$

Для метода наименьшего отклонения средняя дисперсия

$$n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} = \frac{\cos \frac{\theta + \varepsilon}{2}}{2 \sin \frac{\theta}{2}} (\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2}), \quad (31)$$

для автоколлимационного метода

$$n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} = \frac{\cos i}{\sin \theta} (i_{\lambda_1} - i_{\lambda_2}). \quad (32)$$

Основной недостаток гониометрических методов измерения показателя преломления и дисперсии заключается в необходимости изготовления призмы сравнительно больших размеров и высокого качества, а также в трудоемкости измерений и необходимости тщательной выверки гониометра перед измерениями.

РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Эти методы основаны на использовании явления полного внутреннего отражения, возникающего в тех случаях, когда лучи света идут из среды, оптически более плотной, в среду

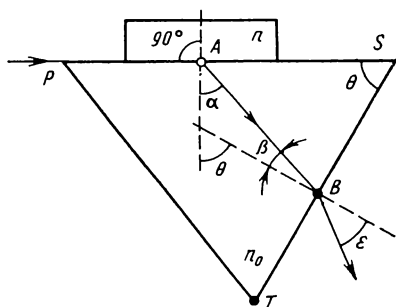


Рис. 31. Ход лучей при рефрактометрических методах измерения показателей преломления

менее плотную, при этом углы падения лучей должны быть равными или большими угла полного внутреннего отражения ϵ , определяемого по формуле

$$\sin \epsilon = n/n_0, \quad (33)$$

где n и n_0 — показатели преломления сред, причем $n_0 > n$.

В рефрактометрических методах (рис. 31) используется эталонная призма PST , показатель преломления n_0 которой и угол θ точно измерены заранее;

на грань PS установлен исследуемый образец стекла с показателем преломления n . Пусть в некоторой точке A луч PA испытал полное внутреннее отражение.

Согласно закону преломления, для точек A и B получим

$$n = n_0 \sin \alpha; \quad \sin \beta = (\sin \epsilon)/n_0. \quad (34)$$

Очевидно, что $\alpha = \theta - \beta$.

Подставляя последовательно значения α и $\sin \beta$ в формулу (34), получаем общую зависимость, на которой основана теория рефрактометрических методов:

$$n = \sin \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \epsilon} \pm \cos \theta \sin \epsilon, \quad (35)$$

где знак плюс используется при $\theta > 90^\circ$, минус — при $\theta < 90^\circ$.

В частном случае, когда $\theta = 90^\circ$ (рефрактометры Пульфриха), имеем

$$n = \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \epsilon}. \quad (36)$$

При $\theta = 60^\circ$ (рефрактометры Аббе)

$$n = 0,5 \left[\sqrt{3(n_0^2 - \sin^2 \epsilon)} \pm \sin \epsilon \right]. \quad (37)$$

Как видно из формулы (35), для определения показателя преломления n необходимо и достаточно измерить лишь один параметр — угол ϵ , так как показатель преломления n_0 эталонной призмы и ее угол θ являются константами прибора и известны с высокой точностью.

Измеряемый образец имеет более простую форму по сравнению с образцом при гониометрических методах, так как необходимо обеспечить отражение лучей только на плоской границе контакта образца с эталонной призмой. Поэтому рефрактометрические методы по сравнению с гониометрическими обеспечивают возможность более быстрого определения показателя преломления, что является их важным преимуществом.

Наша промышленность выпускает рефрактометры ИРФ-22 (типа Аббе) и ИРФ-23 (типа Пульфриха) для твердых и жидких тел, ИРФ-25 — только для твердых тел.

Наибольшее распространение в практике оптических измерений нашел рефрактометр типа Пульфриха (рис. 32). Между исследуемым образцом 3 и эталонной призмой 4 введен слой жидкости, показатель преломления которой имеет промежуточное значение между показателями преломления образца и призмы, т. е. $n > n_{\text{ж}} > n_0$. Слой жидкости имеет форму плоскопараллельной пластины и поэтому не оказывает никакого влияния на результаты измерений. Действительно, согласно закону преломления для точек A , B и C (см. рис. 32)

$$n = n_{\text{ж}} \sin \epsilon'_1 = n_{\text{ж}} \sin \epsilon_2 = n_0 \sin \epsilon'_2;$$

$$n_0 \sin \epsilon_3 = n_0 \cos \epsilon'_2 = \sin \epsilon,$$

что подтверждает справедливость формулы (36).

Однако если слой жидкости имеет форму клина, возникает погрешность в измерении n :

$$\Delta n \approx n_{\text{ж}} \left(1 - \frac{n_0^2}{2n_{\text{ж}}^2} \right) \gamma,$$

где γ — угол клина жидкости.

Если принять $\Delta n = 1 \cdot 10^{-5}$, $n_{\text{ж}} = 1,6$; $n_0 = 1,7$, то $\gamma \approx 3''$. Контролировать клиновидность слоя жидкости можно путем непосредственного наблюдения интерференционных полос, которые располагаются параллельно ребру клина. Ширина полосы b связана с углом клина γ и длиной волны света λ зависимостью

$$b = \lambda / 2\gamma n_{\text{ж}}.$$

Таким образом, чтобы обнаружить клин с углом $\gamma = 3'' = 1,5 \times 10^{-5}$ рад при $\lambda = 0,6$ мкм и $n_{\text{ж}} = 1,6$, необходимо иметь рабочую грань образца не менее 15 мм.

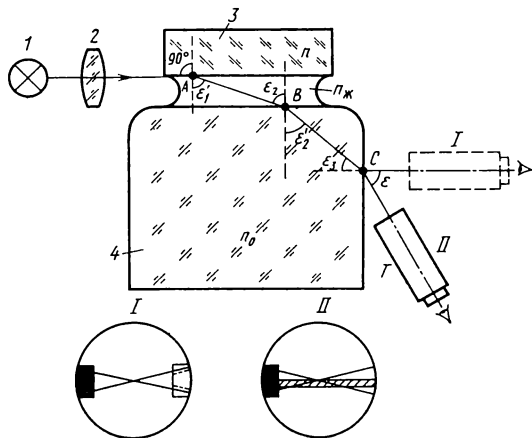


Рис. 32. Принципиальная схема рефрактометра типа Пульфриха:
1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — исследуемый образец; 4 — эталонная призма

В практике для повышения точности измерений образец легкими нажимами руки притирают так, чтобы совершенно уничтожить клин, или добиваются расположения интерференционных полос параллельно плоскости вращения трубы T (рис. 32), когда клиновидность слоя жидкости не имеет значения.

Для выполнения измерений на рефрактометре типа Пульфриха из исследуемого стекла изготавливают образец в форме прямоугольного параллелепипеда размером $20 \times 20 \times 10$ мм. Две взаимно перпендикулярные грани образца полируют с погрешностью в две интерференционные полосы. Прямой угол между полированными гранями должен быть выполнен с погрешностью $\pm 10'$; фаски, выколки и завалы у ребра с прямым углом недопустимы. Стекло образца не должно иметь видимых глазом свилей.

Полированные стороны образца и рабочую поверхность призмы протирают мягкой тканью, смоченной спиртом или бензином. На рабочую поверхность образца с помощью стеклянной палочки наносят каплю жидкости, например, альфа-монобромнафталина ($n_D = 1,66$), йодистого метилена чистого ($n_D = 1,74$) и йодистого метилена, насыщенного серой ($n_D = 1,79$). Контролируемый образец одной полированной поверхностью с каплей жидкости накладывают на призму рефрактометра так, чтобы его другая полированная поверхность была обращена в сторону конденсора. Затем устраняют клиновидность слоя жидкости указанным выше способом. Окончательно установленный образец во время измерений трогать нельзя.

Среди лучей, падающих на боковую грань образца 3 (см. рис. 32), имеются лучи всех возможных направлений: от скользящего луча, идущего вдоль слоя жидкости, до некоторого предельного луча, ограниченного верхним краем боковой грани или специально установленным экраном. Среди лучей, вышедших через боковую грань призмы 4, также имеются лучи всех возможных направлений, но лучей с углом преломления, меньшим ϵ , нет. Поэтому поле изображения зрительной трубы T разделено на две части: одна часть освещена монохроматическим светом, идущим от источника света 1 через конденсор 2, а другая темная. Граница раздела светлого и темного полей определена ходом луча ABC , испытывающим полное внутреннее отражение в точке A .

Собственно процесс измерения сводится к измерению угла ϵ , для чего зрительную трубу сначала устанавливают перпендикулярно к выходной грани эталонной призмы (положение I), что проверяют по автоколлимационному изображению перекрестия. Затем зрительную трубу поворачивают до совмещения центра перекрестия с верхней границей раздела светлого и темного полей (положение II). Угол поворота зрительной трубы и есть угол ϵ . Подставив найденное значение угла ϵ в формулу (35), можно вычислить значение n .

Для анализа точности определения n продифференцируем выражение (36) по переменным ε и n_0 и перейдем к средним квадратическим погрешностям:

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{n_0}{n}\right)^2 \sigma_{n_0}^2 + \left(\frac{\sin 2\varepsilon}{2n}\right)^2 \sigma_\varepsilon^2}. \quad (38)$$

Пример. Пусть $n = 1,61804$; $n_0 = 1,74$; $\sigma_{n_0} = 1 \cdot 10^{-5}$; $\sigma_\varepsilon = 2'' = 1 \cdot 10^{-5}$. Необходимо найти среднюю квадратическую погрешность σ_n .

Используя формулу (36), найдем $\varepsilon = 39,7887^\circ$; затем по формуле (38) вычислим $\sigma_n = 1,12 \cdot 10^{-5}$.

Из приведенного примера видно, что погрешность измерения показателя преломления на рефрактометре приблизительно равна погрешности измерения показателя преломления n_0 эталонной призмы. Однако погрешность измерения n_0 может быть, во-первых, значительно уменьшена (до $2 \cdot 10^{-6}$); во-вторых, учтена как систематическая погрешность. Поэтому, положив $\sigma_{n_0} = 0$, из формулы (38) получим

$$\sigma_n = \frac{\sin 2\varepsilon}{2n} \sigma_\varepsilon. \quad (39)$$

В этом случае, используя данные рассмотренного примера, получим $\sigma_n \approx 0,3\sigma_\varepsilon$, что при $\sigma_\varepsilon = 2''$ дает $\sigma_n = 0,3 \cdot 10^{-5}$. Чтобы погрешность в определении n не превышала $1 \cdot 10^{-4}$, достаточно измерить угол ε с точностью $1'$. Таким образом, с учетом приведенных оговорок рефрактометрический метод оказывается значительно точнее гониометрического метода наименьшего отклонения, в связи с этим оказалось возможным снижение требований к механической части рефрактометра. Благодаря этому сравнительно грубое угломерное устройство рефрактометра обеспечивает измерение показателя преломления оптического стекла с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ и дисперсии с — $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, при этом измерения на рефрактометре выполняются гораздо проще и быстрее, чем на гониометре.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ОБРЕИМОВА

Метод Обреимова относится к числу иммерсионных, основанных на использовании явления исчезновения видимости контуров стекла, погруженного в жидкость. Это явление наблюдается при той длине волны монохроматического света, для которой показатели преломления жидкости и стекла одинаковы.

Основное отличие метода Обреимова от других иммерсионных методов заключается в том, что момент наступления равенства показателей преломления стекла и жидкости устанавливается с очень высокой точностью по интерференционным явлениям, возникающим у контуров стекла, помещенного в жидкость. Метод Обреимова не требует специально изготовленных образцов и позволяет измерить показатели преломления небольших осколков стекла, линз с неизвестными радиусами, призм и т. п.

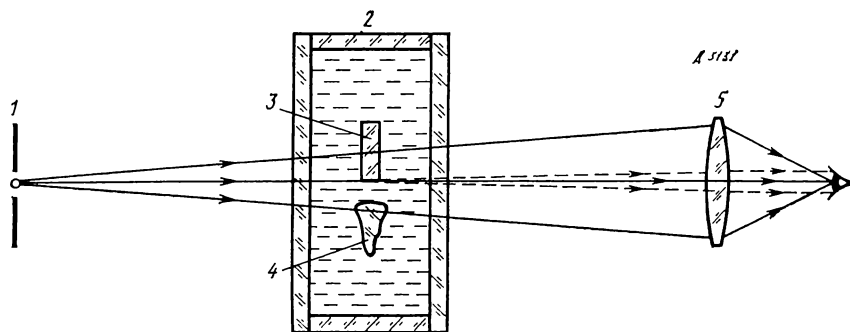


Рис. 33. Схема устройства для измерения показателя преломления методом Обреимова

Для измерения дисперсии погрешность метода можно понизить до $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, хотя в практике оптических лабораторий этим методом обычно измеряют показатели преломления с погрешностью 10^{-4} .

Метод Обреимова реализуют с помощью устройства (рис. 33), основными элементами которого являются монохроматор с выходной щелью 1, кювета 2 с жидкостью и линза 5. В кювету наливают жидкость приблизительно с таким же показателем преломления, как и у контролируемого стекла. Иммерсионные жидкости в зависимости от показателей преломления стекла готовят из следующих составляющих:

| Состав иммерсионной жидкости | Показатель преломления стекла |
|--|-------------------------------|
| Смесь глицерина с водой | 1,33 ... 1,47 |
| Смесь бензина с керосином | 1,35 ... 1,45 |
| Смесь альфа-монобромнафталина с керосином | 1,45 ... 1,65 |
| Смесь альфа-монобромнафталина с йодистым метиленом | 1,65 ... 1,74 |
| Раствор серы в йодистом метиле | 1,74 ... 1,78 |

Образец сравнения 3 представляет собой квадратную плоско-параллельную пластину, одна из боковых граней которой является рабочей. Сторона квадрата пластинки должна составлять не менее 8 мм, толщина $d = 1 \dots 2$ мм. Отклонение от параллельности ребер рабочей грани не должно превышать 2 мкм. Верхний угол пластины сошлифовывается до образования треугольной площадки со сторонами 2 ... 3 мм. Для увеличения точности измерений желательно, чтобы толщина пробы 4 стекла в зоне измерений была не меньше толщины эталона. Поэтому края осколка стекла не должны быть острыми.

Метод основан на явлении исчезновения видимости границ пробы стекла, погруженного в иммерсионную жидкость, при длине волны монохроматического света, для которой показатели преломления жидкости и пробы стекла равны, и сводится к измерению разности показателей преломления измеряемой пробы стекла и образца сравнения, погруженных в иммерсионную жидкость.

Рассмотрим (рис. 34) кривые дисперсии образца сравнения O , пробы стекла Π и иммерсионной жидкости $Ж$. Дисперсия жидкостей всегда больше дисперсии обычных стекол, поэтому если кривые O и Π достаточно близки одна к другой, то всегда можно подобрать такую иммерсионную жидкость, чтобы кривая $Ж$ пересекала обе кривые O и Π в видимой области спектра, а пересечение кривых $Ж$ и Π произошло вблизи заданной длины волны. Физическая сущность метода Обреимова основана на использовании интерференции лучей, дифрагированных на краях образца и пробы. Этот вид дифракции относится к так называемой френелевой дифракции.

Если для какой-либо длины волны λ_0 (см. рис. 34) показатели преломления жидкости и образца сравнения одинаковы, то для лучей этой длины волны жидкость и образец представляют собой оптически однородную среду. Никаких дифракционных явлений на краях образца не возникает. Поэтому в поле зрения лупы контуры образца исчезают (на практике полного исчезновения не возникает по разным причинам: загрязнение поверхностей, более высокая прозрачность стекла по сравнению с жидкостью и т. п.). Все сказанное правомерно и для пробы стекла при длине волны λ_n .

Если показатели преломления жидкости и пробы или жидкости и образца неодинаковы, возникает дифракция лучей. Эти лучи, показанные на рис. 33 штриховыми линиями, интерферируют между собой с разностью хода

$$\delta = (n_{ж} - n_o) d = m\lambda,$$

где $n_{ж}$ и n_o — соответственно показатели преломления жидкости и образца; d — толщина образца; λ — длина волны света.

Всякий раз, когда m — целое число, вдоль рабочего ребра образца располагается светлая интерференционная полоса и образец почти исчезает на общем светлом фоне. Если $2m$ — целое нечетное число, то ребро образца становится темным. Чтобы отличить нулевую полосу ($m = 0$) от других полос, используют сошлифованный угол образца. Этот участок рабочей грани образца исчезает только при $m = 0$.

Вдоль контуров пробы наблюдаются аналогичные явления, однако вследствие неравномерной толщины пробы исчезновение его контуров может произойти только для одной длины волны.

Начинать измерения необходимо с определения кривой дисперсии подобранной жидкости. Для этого по барабану монохроматора от-

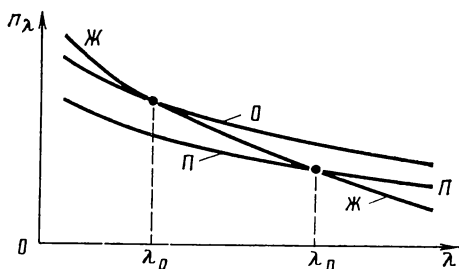


Рис. 34. Дисперсионные кривые образца сравнения O , пробы стекла Π и иммерсионной жидкости $Ж$

мечают те длины волн, которые соответствуют ряду светлых интерференционных полос, и вычисляют

$$n_{\text{ж}} = n_0 + m\lambda/d.$$

Кривая дисперсии образца должна быть определена заранее любым из известных способов. Собственно процесс измерений заключается в следующем.

1. Находят момент исчезновения контура ребра образца и по барабану монохроматора снимают отсчет λ_0 .

2. Вращая барабан монохроматора в сторону длинных волн и считая при этом число светлых полос m , прошедших через ребро образца, определяют длину волны $\lambda_{\text{п}}$, при которой произошло исчезновение пробы исследуемого стекла.

3. Определяют дробную часть полосы Δm , снимая отсчеты λ_m и λ_{m+1} по барабану монохроматора при установке на ближайшие от $\lambda_{\text{п}}$ светлые полосы m и $m + 1$:

$$\Delta m = (\lambda_{\text{п}} - \lambda_m)/(\lambda_{m+1} - \lambda_m).$$

Полученное число полос $m + \Delta m$ выражает разность хода лучей между образцом и равным ему по толщине d слоем жидкости при длине волны $\lambda_{\text{п}}$:

$$(n_0 - n_{\text{ж}})d = (m + \Delta m)\lambda_{\text{п}},$$

отсюда и находят показатель преломления пробы, равный показателю преломления жидкости при длине волны $\lambda_{\text{п}}$:

$$n = n_0 - \frac{(m + \Delta m)\lambda_{\text{п}}}{d}.$$

Чувствительность метода ограничивается точностью измерения дробной части Δm интерференционной полосы. Практика показала, что $m \approx 1/30$ полосы, поэтому

$$\Delta n \approx \lambda/30d.$$

При $\lambda_{\text{п}} = 600$ нм и $d = 2$ мм получим $\Delta n = 1 \cdot 10^{-5}$.

Метод Обреимова применяется на стекловаренных заводах для аттестации оптических стекол по показателю преломления. В этих случаях измерения должны выполняться в соответствии с ГОСТ 5421—73.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллы находят широкое применение в оптическом приборостроении. Основным преимуществом кристаллов по сравнению с другими видами материалов является многообразие их физических и механических свойств. Многие кристаллы прозрачны в широких участках спектра, а значения показателей преломления и дисперсии изменяются в кристаллах значительно

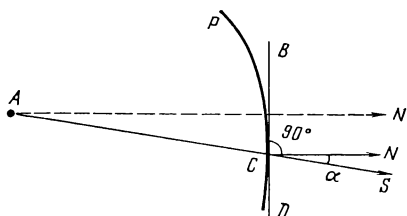


Рис. 35. Распределение света в анизотропной среде

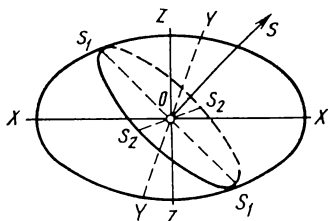


Рис. 36. Эллипсоид Френеля для определения лучевых скоростей в кристалле

сильнее, чем в оптических стеклах. Многие кристаллы имеют высокое значение температуры плавления, что позволяет использовать их в качестве термостойких материалов.

Основное отличие кристаллической среды от сред, подобных оптическому стеклу, заключается в явлении двойного лучепреломления. Это явление вызвано различием в скорости распространения света в кристалле для двух световых волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. С оптической точки зрения анизотропия среды характеризуется различной по разным направлениям способностью среды реагировать на действие падающего света. Показатель преломления, а следовательно, и скорость света зависят от направления распространения световой волны и ее плоскости поляризации. Поэтому для анизотропной среды волновая поверхность P (рис. 35), т. е. поверхность, до которой распространяется за время t световое возбуждение, исходящее из точки A , отлична от сферической, характерной для изотропной среды, в которой скорость распространения света не зависит от направления.

Направление распространения поверхности постоянной фазы (нормаль N к волновой поверхности) не совпадает с лучом S , указывающим направление распространения энергии (радиус-вектор AC). По данному направлению N плоская поляризованная волна распространяется с двумя различными фазовыми скоростями, соответствующими двум различным направлениям колебания электрического (или магнитного) вектора волны. Скорость фазы q , измеренная вдоль нормали, будет отличаться от скорости распространения световой энергии v , измеренной вдоль луча, поэтому $q = v \cos \alpha$, где α — угол между направлением нормали N и направлением луча S .

Двум значениям q_1 и q_2 скорости фронта по нормали, обуславливающим двойное лучепреломление, соответствуют два значения v_1 и v_2 скорости фронта по лучу. Для определения лучевых скоростей v_1 и v_2 воспользуемся вспомогательной поверхностью, называемой эллипсоидом Френеля:

$$n_x^2 x^2 + n_y^2 y^2 + n_z^2 z^2 = \text{const}$$

или

$$(x^2/v_x^2) + (y^2/v_y^2) + (z^2/v_z^2) = 1/c^2,$$

где n_x , n_y , n_z — главные значения показателя преломления; v_x , v_y , v_z — главные лучевые скорости; c — скорость света в вакууме.

Эллипсоид Френеля (рис. 36) служит для определения лучевых скоростей v_1 и v_2 по любому направлению к кристаллу. Для этого надо рассечь эллипсоид плоскостью, перпендикулярной к направлению распространения света (OS). Это сечение в общем случае будет иметь форму эллипса, главные оси которого взаимно перпендикулярны; длины полуосей равны лучевым скоростям v_1 и v_2 , а соответствующие показатели преломления будут:

$$n_1 = c/v_1, \quad n_2 = c/v_2.$$

Если вычислить, пользуясь свойствами кристалла, или измерить экспериментально значения лучевых скоростей (показателей преломления), то можно построить поверхность, до которой дойдет к моменту t световое возбуждение, распространяющееся из данной точки кристалла. Для этого надо по всем направлениям отложить отрезки, пропорциональные $v_1 t$ и $v_2 t$. Получится поверхность с двумя полостями, в общем случае довольно сложного вида. Кристаллы, оптические свойства которых описываются шаровой поверхностью Френеля, оптически изотропны. Кристаллы с оптическими свойствами, описываемыми эллипсоидами вращения, оптически анизотропны; их называют оптически одноосными. Все другие кристаллы принадлежат к оптически двуосным анизотропным кристаллам; их оптические свойства описываются эллипсоидом общего вида. В одноосных кристаллах существует только одно направление, вдоль которого не наблюдается двойное лучепреломление; в двуосных кристаллах таких направлений два. Эти направления называются оптическими осями. В самом общем случае кристалл имеет две оптические оси, угол между которыми зависит от свойств кристаллов. Исследование оптических свойств кристаллов и измерение их оптических констант представляет собой обширную область кристаллооптики.

Наибольшее практическое применение в оптическом приборостроении нашли изотропные и одноосные кристаллы.

Показатели преломления являются основными оптическими константами кристаллов. Их измеряют как для диагностики, так и для выявления вариаций химического состава кристаллов.

Для измерения показателей преломления кристаллов в основном применяют те же методы и приборы, что и для оптического стекла, однако при измерении кристаллов существуют и некоторые особенности, связанные главным образом с ориентированием кристалла в измерительном приборе. Рассмотрим эти особенности для основных методов измерения показателя преломления: гониометрического, рефрактометрического и метода Обреимова.

Гониометрический метод. Для этого метода из исследуемого кристалла необходимо изготовить трехгранную призму, у которой две боковые грани являются рабочими и поэтому должны быть полированными. Если исследуемый кристалл оптически изотропен, то призма может иметь любое кристаллографическое ориентирование. Для измерения показателей преломления одноосных кристаллов призма должна быть ориентирована так, чтобы ребро, по которому пересекаются полированные грани, было параллельно оптической оси кристалла. При таком ориентировании призмы можно непосредственно измерить показатель преломления кристалла для обыкновенных и необыкновенных лучей наиболее точным методом наименьшего отклонения.

Призму из двусосного кристалла изготавливают так, чтобы ее преломляющее ребро было параллельно одной из осей индикатрисы и одна из плоскостей симметрии индикатрисы делила пополам угол между полированными гранями. На такой призме методом наименьшего отклонения можно измерить два главных показателя преломления кристалла. Для измерения третьего показателя преломления нужно изготовить вторую призму, ориентированную подобным же образом, но с иным расположением осей или плоскостей симметрии индикатрисы.

Методика измерений показателей преломления кристалла методом наименьшего отклонения аналогична рассмотренной выше для оптического стекла. Отличие заключается в том, что при измерениях в монохроматическом свете наблюдают два изображения щели коллиматора. Одно из этих изображений образовано лучами с колебаниями, параллельными ребру призмы, другое — с колебаниями, перпендикулярными к нему. Измеряя угол наименьшего отклонения последовательно для каждого изображения щели, определяют соответствующий показатель преломления кристалла.

Рефрактометрический метод. Измерения показателей преломления кристаллов рефрактометрическим методом основаны на использовании явления полного внутреннего отражения и осуществляются на специальных приборах — кристаллах-рефрактометрах. Основной деталью кристалла-рефрактометра является сплошная полусфера из стекла с большим показателем преломления (рис. 37). Плоская поверхность полусферы расположена горизонтально и может вращаться вокруг вертикальной оси. Зрительная труба (на рисунке не показана) с отсчетным устройством может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, причем оптическая ось зрительной трубы при любом ее положении проходит через центр полусферы.

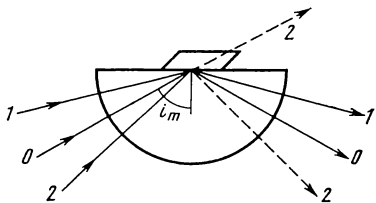


Рис. 37. Схема измерения показателя преломления на кристалл-рефрактометре

Исследуемый кристалл должен иметь одну плоскую полированную поверхность. У оптически изотропных и одноосных кристаллов эта плоскость может быть ориентирована произвольно. У кристаллов двuosных полированную плоскость следует совместить с одной из плоскостей симметрии индикатрисы, чтобы измерить три главных показателя преломления кристалла.

Исследуемый кристалл кладут полированной плоскостью на плоскую поверхность полусферы, предварительно смочив полусферу в месте контакта каплей жидкости, показатель преломления которой имеет промежуточное значение между показателями преломления кристалла и стекла полусферы. С помощью зеркала на кристалл направляют сходящийся пучок света от монохроматического источника. Луч O направлен под предельным углом i_m полного внутреннего отражения. Лучи, падающие на поверхность кристалла под углами больше предельного угла i_m (например, луч 1), полностью отражаются в полусферу. Все остальные лучи, падающие под углами меньше предельного (например, луч 2), проникают в кристалл и лишь частично отражаются в полусферу.

Поле зрительной трубы разделено на две части: светлую, образованную полностью отраженными лучами, и полутемную, образованную частично отраженными лучами. Граница раздела соответствует лучам, отраженным под предельным углом. Установив поворотом трубы ее перекрестие на эту границу, отсчитывают по лимбу угол φ_0 , равный углу полного внутреннего отражения. Показатель преломления, измеренный для данной плоскости кристалла,

$$n = n_c \sin \varphi_0, \quad (40)$$

где n_c — показатель преломления полусферы.

Одна граница в поле зрительной трубы наблюдается только при измерениях оптически изотропных кристаллов. Если кристалл анизотропен, то в поле трубы видны две границы. У одноосных кристаллов эти границы соответствуют показателям преломления для обыкновенных и необыкновенных лучей. При повороте полусферы вокруг ее вертикальной оси эти границы смещаются в поле неподвижной трубы. У одноосных кристаллов смещается только одна граница, соответствующая необыкновенному показателю преломления, а граница, соответствующая обыкновенному, не меняет своего положения. Предельные углы полного внутреннего отражения измеряют при таком положении полусферы, когда обе границы расположены на максимальном расстоянии одна от другой. Сделав отсчеты для обеих границ, поворачивают полусферу на 180° и повторяют отсчеты. Для вычисления показателя преломления для той или другой волны выбирают среднее значение предельного угла из двух отсчетов и подставляют его в формулу (40).

У двuosных кристаллов, оптолированных по плоскости симметрии индикатрисы, в поле трубы также наблюдаются две гра-

ницы, одна из которых не смещается при вращении полусферы. При измерении показателей преломления кристалла по первой границе выполняют отсчет при любом положении полусферы, при измерении по второй — при самом высоком и самом низком положениях границы. Каждый из отсчетов повторяют при повороте полусферы на 180° и выбирают среднее значение из двух отсчетов. По полученным трем значениям угла φ_0 вычисляют три главных показателя преломления кристалла.

Метод Обреимова. Для измерения показателей преломления кристаллов этим методом поляризатор устанавливают перед кюветой, за кюветой необходимо установить анализатор. Если исследуемый кристалл двуосный, то для измерения трех главных показателей преломления он должен быть закреплен в ориентированном положении так, чтобы одна из осей его индикатрисы была параллельна стержню держателя. Ориентирование кристалла должно выполняться заранее, например, с помощью столика Федорова или конометра. При измерении показателей преломления одноосных кристаллов ориентирование не требуется.

После установки кристалла в кювете необходимо поляризатор и анализатор ориентировать так, чтобы плоскости поляризации были взаимно перпендикулярны, что проверяют по погасанию света. Удалив поляризатор, наблюдают вертикальные участки кристалла при вращении барабана монохроматора. В момент равенства показателей преломления кристалла и жидкости светлая полоска переходит через край кристалла, причем край, обычно кажущийся темным, в этот момент светлеет. Дальнейшие измерения и обработку результатов выполняют аналогично измерениям показателей преломления оптического стекла, рассмотренным выше.

Метод Обреимова обеспечивает высокую точность измерений. Экспериментальные проверки точности метода Обреимова на кристаллах показали, что погрешности при измерении обыкновенного показателя преломления кристалла не превышают 10^{-4} , при измерении необыкновенного показателя преломления погрешности меньше $2 \cdot 10^{-4}$.

Измерение показателей преломления и дисперсии оптических материалов в невидимых областях спектра (ультрафиолетовой и инфракрасной) в основном выполняется гониометрическими методами. Особенности измерения заключаются в том, что в качестве источников излучения используются такие источники, в спектре которых содержатся излучения необходимых длин волн (например, искра Милликена и импульсные капиллярные источники для ультрафиолетовой области спектра, электрические лампы накаливания, штифт Нернста, силовый излучатель для инфракрасной области спектра). Приемники излучения должны быть чувствительны к излучению тех длин волн, для которых осуществляется измерение, а оптическая система прибора должна быть прозрачна для соответствующего диапазона длин волн. Исходя

из этих соображений в оптических системах приборов для измерения показателя преломления в невидимых областях спектра используют в основном зеркальные оптические элементы, а регистрацию измерительного сигнала выполняют фотоэлектрическим методом. Научные принципы измерения практически остаются теми же, что и для видимой области спектра.

Другие характеристики оптического стекла измеряют методами, описанными в соответствующих стандартах. Оптическую однородность стекла определяют по разрешающей способности (ГОСТ 3518—80), которая определяется значением отношения угла разрешения φ дифрактометра (коллиматорной установки по ГОСТ 3518—80), в параллельный пучок лучей которого введена заготовка стекла, к углу разрешения φ_0 самого дифрактометра.

Двойное лучепреломление измеряют по ГОСТ 3519—80 на поляриметре с предельной погрешностью не более установленной указанным стандартом для стекол с различным значением разности хода. Показатель ослабления измеряют по ГОСТ 3520—84. Бесцветность стекла определяют по ГОСТ 3521—81; пузырность — по ГОСТ 3522—81; радиационно-оптическую устойчивость определяют на специальной установке по ГОСТ 3520—84.

ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

1. ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

В большинстве случаев допуски на толщины линз и пластин, а также на воздушные промежутки между ними составляют десятые и сотые доли миллиметра. Допуски на толщины фазовых пластин более жесткие, их значения не превышают десятых долей микрометра. Известные способы измерения толщин различаются по точности и трудоемкости.

Механический метод широко применяется в цехах для измерения толщин линз, пластин и воздушных промежутков. Он реализуется на контактных длиномерах, оптиметрах, оптикаторах и контактных интерферометрах. Эти приборы, как правило, основаны на принципе Аббе, заключающемся в том, что при точных измерениях следует располагать известную длину (например, ось шкалы) и измеряемую длину на одной оси, т. е. одну за другой или одну над другой.

Длиномеры, обеспечивающие абсолютные измерения (рис. 38, а), имеют два вертикально расположенных измерительных стержня: подвижный 3 и неподвижный 1. Концы стержней выполняются сферическими или в виде опорных площадок малого размера. Измеряемую деталь 2 одной из рабочих поверхностей устанавливают на нижний неподвижный стержень 1 и центрируют на нем. Критерием центрировки служит устойчивость детали. Подвижный стержень 3 опускают до соприкосновения со второй рабочей поверхностью линзы. По шкале 4, соединенной с подвижным стержнем и освещенной лампой накаливания 5, снимают первый отсчет с помощью отсчетного микроскопа 6 со спиральным окулярным микрометром. Второй отсчет снимают по той же шкале в момент, когда оба стержня соприкасаются (без измеряемой детали). Разность отсчетов равна толщине детали. Погрешность измерений без учета поправок по аттестату шкалы определяется по формуле: $\Delta d = \pm (0,0014 + d/140\,000)$ мм, где d — измеряемая толщина в миллиметрах.

Выпускаемые промышленностью вертикальные длиномеры ИЗВ-1, ИЗВ-2, ИЗВ-3 и ИЗВ-21 предназначены для измерения толщины деталей до 100 мм абсолютным способом и до 250 мм способом сравнения с концевыми мерами. Приборы ИЗВ-2 и ИЗВ-21 имеют центрировочный микроскоп, который можно использовать для бесконтактных измерений. ИЗВ-3 снабжен устройством для проекции шкалы на экран, что облегчает работу оператора.

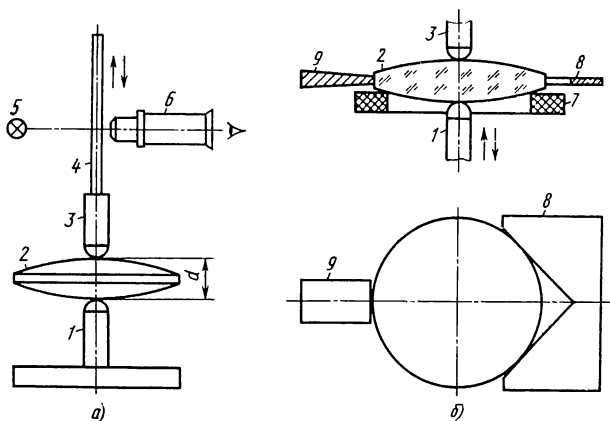


Рис. 38. Схемы измерения толщин на контактных длиномерах:

а — ИЗВ; *б* — длиномер с опорным кольцом

Недостаток длиномеров заключается в том, что при установке детали на нижний стержень и ее центровке может быть повреждено покрытие рабочей поверхности детали. Поэтому разработан прибор (рис. 38, б), в котором измеряемую деталь 2 устанавливают на опорное кольцо 7 и центрируют с помощью призмы 8 и упора 9. Стержни 1 и 3 подвижны и при измерении их вводят в легкое соприкосновение с рабочими поверхностями детали, затем стержень 3 фиксируют винтом, деталь вынимают, и нижний стержень 1 под действием пружины входит в соприкосновение с верхним. Разность отсчетов, соответствующих двум положениям нижнего стержня, равна толщине детали.

Оптиметры снабжены столом для базирования детали и высокочувствительной рычажно-оптической системой, состоящей из подвижного измерительного стержня, соединенного с зеркалом, и автоколлимационной зрительной трубы. Диапазон перемещения измерительного стержня составляет доли миллиметра, а погрешность измерений — доли микрометра. Измерение толщин на оптиметрах обычно выполняют методом сравнения с концевой мерой или эталонной деталью. Серийно выпускают вертикальный ОВО-1 и горизонтальный ОГО-1 оптиметры, снабженные окулярной системой визирования шкалы, а также вертикальные оптиметры ОВЭ-1 и ОВЭ-02 с проекционным экраном. Диапазон перемещения измерительного стержня оптиметров ОВО-1, ОГО-1 и ОВЭ-1 составляет $\pm 0,1$ мм, вариации показаний по шкале не более 0,1 мкм. Оптиметр ОВЭ-02 предназначен для измерений в пределах ± 25 мкм, вариации показаний по шкале 0,02 мкм.

Прибор для измерения значений воздушных промежутков между оптическими деталями в процессе сборки систем (рис. 39)

содержит основание *11*, на котором неподвижно закреплены стол *10* и стойка *6* с резьбой и шпоночным пазом. Стол *1* и кронштейн *5* могут перемещаться вдоль стойки при вращении гаек *7*. Индикаторы *3* и *9* закреплены на кронштейне.

Порядок измерений следующий: линзу *2* вставляют в оправу *4*. Оправу устанавливают на стол *1* центрированно относительно измерительного стержня индикатора *3*. Стол *1* и кронштейн *5* устанавливают так (рис. 39, *I*), чтобы оба индикатора показывали нулевые отсчеты. При этом вершина поверхности линзы *2* лежит в плоскости стола *10*. Линзу *12* устанавливают на стол *10* центрированно относительно оси измерительного стержня индикатора *3* (рис. 39, *II*). Опуская кронштейн с индикаторами, вновь добиваются нулевого отсчета на индикаторе *9*, после чего положение кронштейна фиксируют упором *8*. Затем (рис. 39, *III*), приподняв кронштейн с индикаторами, в оправу вставляют опорное кольцо *13* и линзу *12*, которая была на столе *10*. Кронштейн опускают до упора, при этом отсчет на индикаторе *3* соответствует значению воздушного промежутка между линзами. Погрешность измерения составляет 0,01 мм, максимально возможная высота линзовой сборки 100 мм.

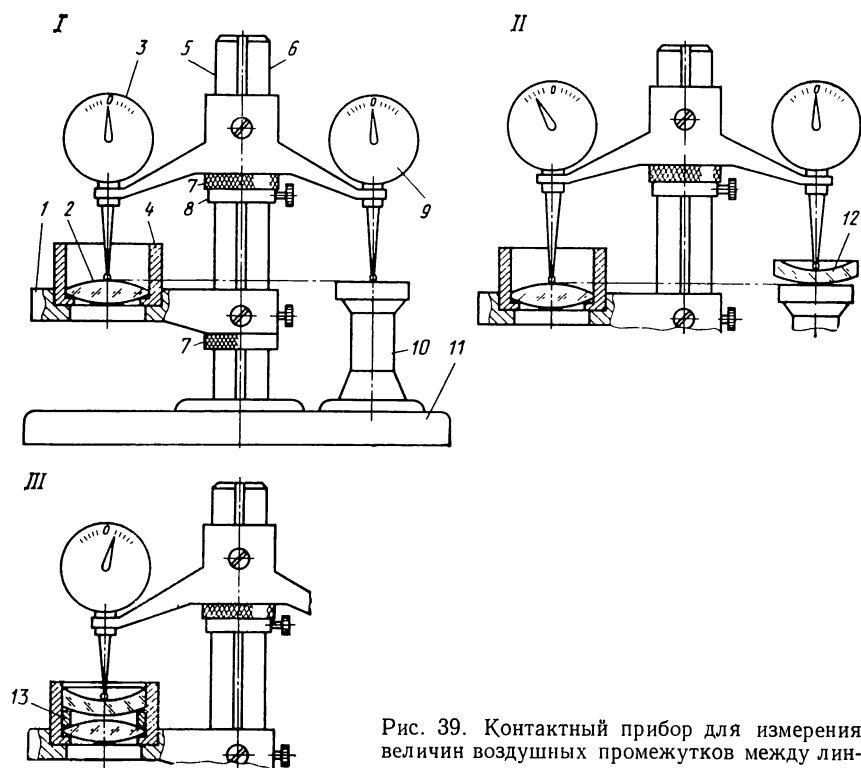


Рис. 39. Контактный прибор для измерения величин воздушных промежутков между линзами

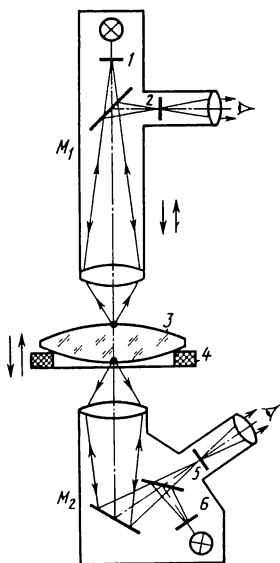


Рис. 40. Схема оптического толщиномера

Оптический метод. С помощью этого метода измеряют толщины без прикосновения мерительного инструмента к рабочим поверхностям детали. Рассмотрим автоколлимационный и поляризационный способы.

Автоколлимационный способ измерений выполняется с помощью оптического толщиномера, бесконтактного оптического микрометра и микроскопа. В процессе измерений световые пучки, выполняющие роль измерительного наконечника, фокусируют на рабочие поверхности детали. Погрешность измерения существенно зависит от числовой апертуры объектива измерительного прибора, поскольку значение апертуры влияет на чувствительность продольной наводки.

Оптический толщиномер (рис. 40) состоит из двух автоколлимационных микроскопов M_1 и M_2 , установленных навстречу один к другому, и предметного столика 4. Микроскоп M_2 неподвижен,

микроскоп M_1 может перемещаться в вертикальном направлении и снабжен стрелочным индикаторным устройством для отсчета значения перемещения.

Перед началом измерений микроскоп M_1 устанавливают таким образом, чтобы предметные плоскости обоих микроскопов и их оси были совмещены. В этом случае изображения перекрестий сеток 1 и 5, а также 2 и 6 будут совмещены и видны одинаково резко. В этом положении микроскопа M_1 по шкале индикатора снимают первый отсчет. После этого измеряемую деталь 3 устанавливают на столик 4, перемещением которого добиваются резкого автоколлимационного изображения перекрестия сетки 6 в плоскости сетки 5 микроскопа M_2 . Перемещая микроскоп M_1 в направлении от детали, добиваются резкого изображения перекрестия сетки 6, после чего по шкале индикатора снимают второй отсчет. Разность отсчетов равна толщине детали. Погрешность измерений составляет $\pm 0,02 \dots 0,03$ мм. Если поверхности детали шлифованные, то в микроскопы M_1 и M_2 наблюдают изображения самих поверхностей.

Оптический бесконтактный микрометр ОБМ-2 состоит из двух двойных микроскопов Линника, проецирующих на противоположные рабочие поверхности измеряемой детали изображения двух освещенных щелей, которые наблюдаются совместно. Критерием точной наводки микроскопов на противоположные поверхности детали служит то, что изображения щелей лежат на одной линии. При совмещении предметных плоскостей микроскопов в отсут-

ствии измеряемой детали изображения щелей оказываются на одной линии. Такая система обеспечивает повышение точности фокусировки, при этом погрешность измерений толщин составляет ± 4 мкм.

Оптический толщиномер и бесконтактный микрометр позволяют выполнять как абсолютные, так и относительные измерения. Относительные измерения обычно выполняют в условиях серийного производства и на отсчетных шкалах наносят поле допуска. При использовании ОБМ-2 отклонение толщины измеряемой детали от номинала приводит к взаимному смещению наблюдаемых изображений щелей. Значение a смещения щелей, определяющее поле допуска, связано с допуском Δd на толщину измеряемых деталей зависимостью: $a = \sqrt{2\beta\Delta d}$, где β — увеличение объектива микроскопа.

С помощью обычного или автоколлимационного микроскопов, снабженных устройством для точного отсчета продольных перемещений, можно измерять толщины пластин, линз и воздушных промежутков путем последовательной фокусировки микроскопа на оптические поверхности, расстояние между которыми нужно измерить.

При измерении толщины плоскопараллельной пластины 2 (рис. 41, а) микроскоп 1 фокусируют на поверхности P_1 и P_2 , причем при фокусировании на P_2 предметную точку микроскопа совмещают с точкой B' — изображением точки B . Толщину пластины 2 определяют по формуле $d = nz$, где n — показатель преломления пластины, z — значение перемещения микроскопа вдоль шкалы 3.

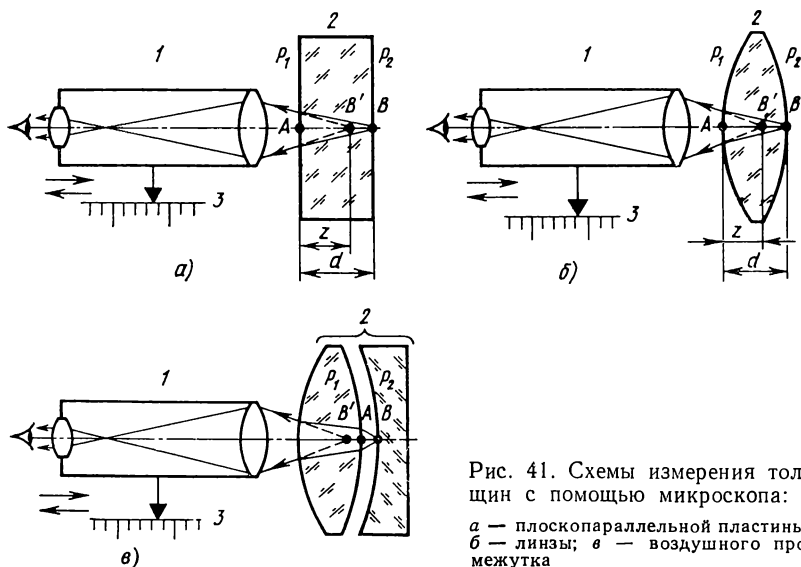


Рис. 41. Схемы измерения толщин с помощью микроскопа:

а — плоскопараллельной пластины;
б — линзы; в — воздушного промежутка

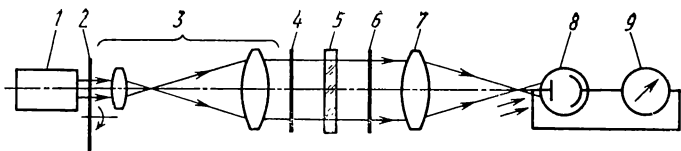


Рис. 42. Схема прибора для контроля толщины четвертьволновых пластин

Измерение толщины d линзы 2 (рис. 41, б) выполняют аналогичным способом с последующим вычислением по формуле

$$d = \frac{nrz}{r - (n - 1)z},$$

где r — радиус кривизны поверхности P_1 .

Толщину воздушного промежутка (рис. 41, в) измеряют путем фокусирования микроскопа 1 на поверхности P_1 и P_2 , принадлежащие двум соседним линзам 2.

Очевидным недостатком автоколлимационного способа является необходимость предварительного точного измерения конструктивных параметров, входящих в расчетные формулы. Кроме того, способ неприменим для деталей большой толщины, так как рабочие расстояния серийных микрообъективов не превышают 27 мм. Применение автоколлимационного микроскопа повышает надежность измерений, поскольку с его помощью возможно точно центрировать измерительную систему.

Рассмотренные схемы целесообразно применять в тех случаях, когда использование других способов невозможно, например, для собранных оптических систем.

Поляризационный способ используют для контроля оптической разности хода, создаваемой фазовыми четвертьволновыми пластинами. Правильно изготовленная пластина должна создавать разность хода

$$\Delta z = d(n_o - n_e) = (2k + 1)\lambda/4,$$

где d — толщина пластины, n_o и n_e — показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей, λ — рабочая длина волн, k — целое число.

Такая пластина преобразует плоскополяризованную волну в волну с круговой поляризацией. В случае отклонения толщины пластины от номинала создаваемая ею разность хода не кратна $\lambda/4$ и прошедшая через пластину волна будет поляризована эллиптически. Способ основан на измерении в двух взаимно перпендикулярных плоскостях интенсивностей I_{\perp} и I_{\parallel} волн, прошедших через фазовую пластину. При равенстве $I_{\perp} = I_{\parallel}$ имеет место круговая поляризация и толщина пластинки соответствует номиналу. Если $I_{\perp} \neq I_{\parallel}$, то по отношению I_{\perp}/I_{\parallel} оценивают степень эллиптичности, по которой определяют годность пластины.

Измерения выполняют фотоэлектрическим способом (рис. 42). Источником излучения служит лазер 1 типа ЛГ-126, излучающий

на трех длинах волн (см. табл. 5), что расширяет диапазон применения установки. Приемником излучения 8 служит вакуумный фотоэлемент, индикатором 9 — микровольтметр. Модулятор 2 создает модулированный поток излучения, чтобы исключить зависимость электрического сигнала от времени облучения чувствительной площадки приемника. Для расширения лазерного пучка используют телескопическую систему 3. Поляризатор 4 создает линейно поляризованное излучение. Объектив 7 направляет излучение на чувствительную площадку приемника.

Перед установкой контролируемой фазовой пластины 5 поляризатор 4 и анализатор 6 должны находиться в скрещенном положении, при этом электрический сигнал имеет минимальное значение и определяется шумами схемы. Затем между поляризатором и анализатором вводят контролируемую пластину, которую можно вращать вокруг оптической оси системы. При введении фазовой пластины электрический сигнал увеличивается, так как нарушается поляризационное состояние системы и увеличивается ее пропускание. Вращая пластину вокруг оси системы, добиваются минимально возможного сигнала U_1 , что соответствует углу 45° между плоскостью поляризации падающей волны и оптической осью пластины. При такой ориентации точно изготовленная четвертьволновая пластина должна преобразовывать плоскополяризованную волну в волну с круговой поляризацией. Повернув анализатор на 90° , с микровольтметра снимают сигнал U_2 . Полученные сигналы U_1 и U_2 пропорциональны интенсивностям I_\perp и I_\parallel . Равенство $U_1 = U_2$ соответствует круговой поляризации. Если $U_1 \neq U_2$, то действительная разность хода, вносимая пластиной,

$$\Delta z = \lambda \frac{\arctg \sqrt{U_1/U_2}}{180^\circ}.$$

Погрешность определения разности хода составляет тысячные доли микрометра.

2. РАДИУСЫ КРИВИЗНЫ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Допуски на отклонение радиусов кривизны сферических поверхностей обычно составляют доли процента номинальных значений радиусов. При обработке сферических поверхностей основным цеховым инструментом для контроля радиусов кривизны служит рабочее пробное стекло. Для измерения радиусов кривизны поверхностей готовых изделий используют различные приборы, применяемые при механическом и оптическом методах.

Механический метод. Для измерений этим методом используют радиусные шаблоны и сферометры.

Радиусные шаблоны используют для контроля радиусов в процессе шлифования. Их изготавливают из латуни или стали парами:

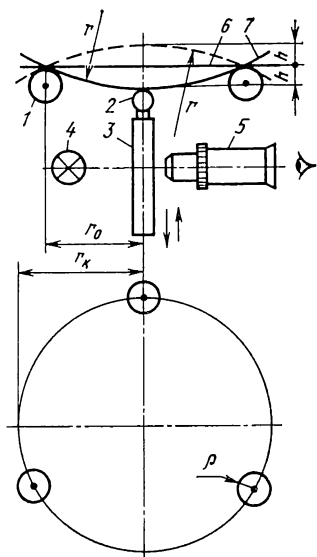


Рис. 43. Схема измерения радиусов сферических поверхностей контактным сферометром ССО

рений. В соответствии с ГОСТ 11194—76 сферометры изготовляют двух типов: ССО — стационарные с оптическим отсчетным устройством и СНО — накладные с оптическим отсчетным устройством. ССО предназначены для измерения радиусов поверхностей в диапазоне 10 ... 1000 мм на деталях диаметром 20 ... 130 мм; СНО — в диапазоне 80 ... 40 000 мм деталей диаметром не менее 120 мм.

К основным элементам сферометра (рис. 43) относятся комплект опорных колец с тремя стальными шариками 1, измерительный стержень 2 со шкалой 3, подсвеченной лампой 4, и отсчетный микроскоп 5. К сферометру прилагается стеклянная пластина, рабочая поверхность 6 которой выполнена плоской с точностью 0,1 ... 0,25 интерференционного кольца.

Радиус на сферометре ССО измеряют следующим образом. Из набора опорных колец выбирают кольцо, диаметр которого на 5 ... 10 мм меньше диаметра детали, и устанавливают его на сферометр. Деталь базируют на шарики опорного кольца и вводят измерительный стержень в соприкосновение с измеряемой поверхностью 7, при этом по шкале снимают отсчет a_1 . Затем на место детали устанавливают пластину, вводят стержень в соприкосновение с ее плоской поверхностью и снимают отсчет a_2 . Разность отсчетов $a_1 - a_2 = h$, где h — стрелка прогиба поверхности.

Из геометрических соотношений (см. рис. 43) следует, что искомый радиус

$$r = [(r_k^2 + h^2)/(2h)] \pm \rho, \quad (42)$$

шаблон и контршаблон. Радиусы шаблонов соответствуют восьмому качеству точности. Шаблон накладывают на проверяемую поверхность и наблюдают просвет между поверхностями детали и шаблона. Отклонение контролируемого радиуса от эталонного r в зависимости от толщины d просвета определяют по выражению

$$\Delta r = 8d (r/l)^2, \quad (41)$$

где l — длина хорды, на которой наблюдается просвет.

Так как опытный наблюдатель видит просвет толщиной 2 мкм, то надежно обнаруживаемое отклонение, выраженное в микрометрах,

$$\Delta r = 16 (r/l)^2.$$

Сферометры позволяют измерять стрелку прогиба шарового сегмента поверхности контактным способом. Основное преимущество сферометров — высокая точность и стабильность измерений.

В соответствии с ГОСТ 11194—76 сферометры изготовляют двух типов: ССО — стационарные с оптическим отсчетным устройством и СНО — накладные с оптическим отсчетным устройством. ССО предназначены для измерения радиусов поверхностей в диапазоне 10 ... 1000 мм на деталях диаметром 20 ... 130 мм; СНО — в диапазоне 80 ... 40 000 мм деталей диаметром не менее 120 мм.

К основным элементам сферометра (рис. 43) относятся комплект опорных колец с тремя стальными шариками 1, измерительный стержень 2 со шкалой 3, подсвеченной лампой 4, и отсчетный микроскоп 5. К сферометру прилагается стеклянная пластина, рабочая поверхность 6 которой выполнена плоской с точностью 0,1 ... 0,25 интерференционного кольца.

Радиус на сферометре ССО измеряют следующим образом. Из набора опорных колец выбирают кольцо, диаметр которого на 5 ... 10 мм меньше диаметра детали, и устанавливают его на сферометр. Деталь базируют на шарики опорного кольца и вводят измерительный стержень в соприкосновение с измеряемой поверхностью 7, при этом по шкале снимают отсчет a_1 . Затем на место детали устанавливают пластину, вводят стержень в соприкосновение с ее плоской поверхностью и снимают отсчет a_2 . Разность отсчетов $a_1 - a_2 = h$, где h — стрелка прогиба поверхности.

Из геометрических соотношений (см. рис. 43) следует, что искомый радиус

$$r = [(r_k^2 + h^2)/(2h)] \pm \rho, \quad (42)$$

где r_k — радиус кольца и ρ — радиус шарика известны с высокой точностью, так как они являются константами прибора. Знаки «+» и «—» в формуле соответствуют вогнутой и выпуклой поверхностям.

При измерении радиусов пары пробных стекол в целях повышения точности сначала измеряют стрелку прогиба одного из стекол и вычисляют его радиус по формуле (42), считая полученное значение приближенным ($r = r_{\text{пр}}$). Затем на опорное кольцо последовательно устанавливают выпуклое и вогнутое пробные стекла, вводят измерительный стержень в соприкосновение с измеряемыми поверхностями и снимают отсчеты a_1 и a_2 . Очевидно, что в этом случае разность $a_1 - a_2 = 2h$. Радиус пробных стекол

$$r = (r_0^2 + h^2)/(2h), \quad (43)$$

где r_0 — радиус окружности, образованной при пересечении вогнутой и выпуклой поверхностей. Значение r_0 предварительно вычисляют по формуле

$$r_0 = r_k \{1 + \rho^2/[2(r_{\text{пр}}^2 - r_k^2)]\}.$$

Продифференцировав формулы (42) и (43), получим зависимости для определения погрешностей измерений радиусов отдельных поверхностей:

$$dr = \frac{r_k}{h} dr_k + 0,5 \left(1 - \frac{r_k^2}{h^2}\right) dh + d\rho;$$

для пары пробных стекол

$$dr = \frac{r_0}{h} dr_0 + 0,5 \left(1 - \frac{r_0^2}{h^2}\right) dh.$$

Для сферометра ИЗС-7 типа ССО $dr_k \leq 2$ мкм, $d\rho \leq 2$ мкм, $dh \leq 1$ мкм. Относительная погрешность измерения на сферометре радиусов поверхностей составляет 0,04 ... 0,07 %, а пары пробных стекол — 0,02 %. Сферометр ИЗС-8 типа СНО, предназначенный для поверхностей крупногабаритных деталей, обеспечивает измерения радиусов с относительной погрешностью 0,02 ... 0,5 %.

Оптический метод. Измерение и контроль радиусов кривизны выполняют интерференционным и автоколлимационным способами. Интерференционный способ обеспечивает высокую точность измерений, но является контактным. При автоколлимационном способе точность измерений ниже, однако деталь не контактирует с измерительным инструментом.

Интерференционный способ основан на сравнении измеряемой поверхности с образцовой сферической поверхностью, радиус кривизны которой известен с высокой точностью. Деталь с образцовой поверхностью называется пробным стеклом.

На оптических предприятиях имеется комплект пробных стекол с радиусами кривизны образцовых поверхностей, соответствующими ГОСТ 1807—75. Пробные стекла изготавливают парами: с выпуклой и с вогнутой образцовыми поверхностями.

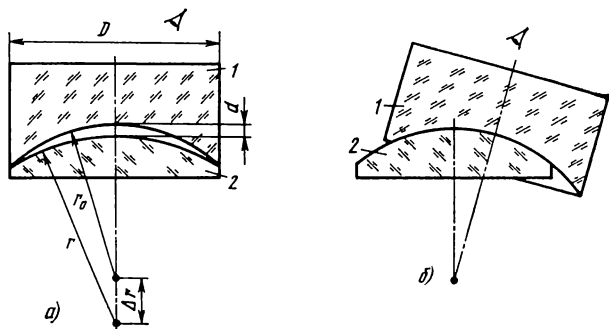


Рис. 44. Схема наложения пробного стекла:

a — контроль радиуса кривизны; *б* — контроль сферичности поверхности

ГОСТ 2786—82 предусматривает пробные стекла трех типов: РПС — рабочие пробные стекла для контроля радиусов сферических поверхностей оптических деталей; КПС — контрольные пробные стекла для проверки поверхностей РПС; ОПС — образцовые пробные стекла для проверки поверхностей КПС. Пробные стекла изготавливают строго сферическими, и их радиусы кривизны соответствуют номиналу с высокой точностью. В новых разработках применяются стекла только первого и второго классов точности. Предельные отклонения радиусов ОПС составляют 0,01 ... 0,3 % номиналов радиусов, лежащих в диапазоне 0,5 ... 1000 мм. Для ОПС с радиусами свыше 1000 мм отклонения от номинала не превышают 0,05 %.

Диаметры стандартных пробных стекол не превышают 130 мм. Для контроля больших поверхностей изготавливают пробные стекла диаметром 150, 180 и 220 мм. Для точных измерений необходимо, чтобы диаметр пробного стекла был не меньше диаметра измеряемой детали. Если диаметр детали больше диаметра пробного стекла, то на чертеже детали оговаривается диаметр пробного стекла.

Пробное стекло 1 (рис. 44, *a*) с радиусом r_0 , равным номинальному значению радиуса детали, обозначенного на чертеже, накладывают на деталь 2. Предварительно поверхности пробного стекла и детали очищают спиртом или эфиром с помощью обезжиренных салфеток и кисточек. Если радиус поверхности детали $r \neq r_0$, то в воздушном промежутке между поверхностями образуется кольцевая интерференционная картина, причем радиусы колец относятся между собой как корни квадратные из целых чисел (правило Ньютона). Если при толщине d воздушного зазора наблюдается N интерференционных колец, то $d = N\lambda/2$, где λ — длина волны света.

Толщину d можно представить как разность стрелок прогиба образцовой и измеряемой поверхностей в зоне диаметром D :

$$d = \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) = \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0 \pm \Delta r} \right).$$

Знаки « \pm » при Δr относятся соответственно к случаям $r > r_0$ и $r < r_0$.

Так как $|r_0| \gg |\Delta r|$, то

$$d = \pm \Delta r D^2 / (8r_0^2).$$

Тогда N колец свидетельствует об отклонении радиуса поверхности от r_0 на значение

$$\Delta r = \pm 4N\lambda r_0^2 / D^2. \quad (44)$$

Для удобства контроля допуск на отклонение радиуса кривизны задается на чертеже числом N интерференционных колец и классом точности пробного стекла. Процесс контроля сводится к подсчету числа колец и сравнению с допуском. Обычно N определяется с точностью до 0,5 кольца, что соответствует $\Delta r/r$ порядка сотых или тысячных долей процента. Погрешность способа складывается из погрешности определения N и погрешности образцового радиуса r_0 , которая определяется классом пробного стекла.

При необходимости значение Δr вычисляют по формуле (44), знак при Δr определяют по изменению интерференционной картины при легком осевом нажиме на пробное стекло. Если кольца стягиваются к центру, то радиус кривизны выпуклой поверхности больше r_0 ; если кольца расходятся от центра, то радиус кривизны выпуклой поверхности меньше r_0 . Для вогнутой измеряемой поверхности — наоборот.

Преимуществом интерференционного метода является возможность попутно проверить сферичность измеряемой поверхности: если поверхность сферическая, то при поперечном сдвиге пробного стекла (см. рис. 44, б) вид интерференционной картины не изменяется. Недостаток метода заключается в том, что он неприменим для контроля радиусов поверхностей с отражающими и просветляющими покрытиями.

Радиусы кривизны более 1000 мм можно измерять плоским пробным стеклом (рис. 45). При этом образуется система колец Ньютона с темным пятном в центре, так как при отражении осе-

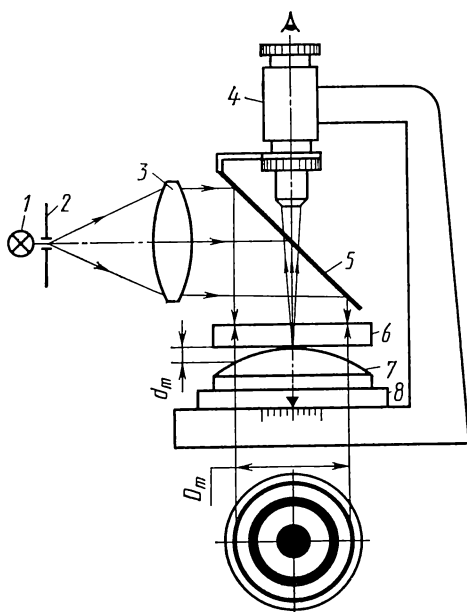


Рис. 45. Схема измерения радиусов сферических поверхностей по кольцам Ньютона

вого луча от нижней поверхности пробного стекла фаза волны изменяется на π . При наблюдении в белом свете кольца видны только в центральной части, в монохроматическом свете хорошо видны и периферийные кольца. Толщина d_m воздушного зазора связана с порядковым номером m темного кольца (начало отсчета — середина) соотношением $d_m = m\lambda/2$. Темное кольцо диаметром D_m соответствует воздушному зазору толщиной $d_m = D_m^2/(8r)$, где r — измеряемый радиус. Очевидно, что

$$r = D_m^2/(4m\lambda). \quad (45)$$

Для вычисления радиуса по формуле (45) необходимо знать диаметр темного кольца, его порядковый номер и длину волны излучения.

Обычно для измерения таким способом используют микроскопы 4 типа УИМ или БМИ с осветительным устройством, включающим источник 1 монохроматического излучения, диафрагму 2, объектив коллиматора 3 и полупрозрачную пластину 5. Измеряемую деталь 7 устанавливают на предметный стол 8 микроскопа и на нее накладывают плоское пробное стекло 6. Диаметры колец измеряют путем перемещения стола 8 до совмещения центра перекрестия микроскопа с серединой интерференционной полосы.

В точке контакта пробного стекла с деталью происходит деформация детали, в связи с чем может возникнуть ошибка в определении порядкового номера измеряемого кольца. Поэтому для вычисления радиуса используют формулу

$$r = \frac{D_m^2 - D_i^2}{4\lambda(m - i)}, \quad (46)$$

в которую подставляют измеренные диаметры D_m и D_i двух интерференционных колец с номерами m и i .

Относительная погрешность измерения

$$\frac{dr}{r} = \frac{2(D_m dD_m + D_i dD_i)}{D_m^2 - D_i^2}. \quad (47)$$

Формула (47) получена из выражения (46) путем дифференцирования и замены в числителе знака «—» на знак «+». Очевидно, что погрешность измерения диаметров интерференционных колец, определяемая точностью наводки перекрестия микроскопа на середину интерференционной полосы, приводит к погрешности измерения радиуса поверхности. Обычно наводка на середину полосы осуществляется с погрешностью 0,1 ширины полосы. Учитывая, что при измерении диаметра кольца наводка осуществляется дважды, имеем $dD_m = 0,2b_m$ и $dD_i = 0,2b_i$, где b_m и b_i — ширина колец с номерами m и i .

Известно, что ширина интерференционной полосы равна отношению длины волны света к углу между интерферирую-

щими лучами. Тогда из выражений $b_m \approx r\lambda/D_m$ и $b_i \approx r\lambda/D_i$, с учетом формулы (45) определим

$$\left. \begin{aligned} b_m &\approx 0,5 \sqrt{r\lambda/m}; \\ b_i &\approx 0,5 \sqrt{r\lambda/i}. \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Окончательно с учетом формулы (46) имеем

$$dr/r = 0,2/(m - i). \quad (49)$$

Из выражения (49) следует, что по мере увеличения разности $m - i$ уменьшается погрешность измерения. На практике для исключения влияния деформации центральной части детали выбирают $i \approx 5 \dots 10$; m определяется периферийным кольцом, которое надежно разрешается измерительным микроскопом совместно с глазом наблюдателя. Условие разрешения крайнего кольца определяется как $b_m > \delta$, где δ — предел разрешения микроскопа, связанный с его видимым увеличением $\bar{\Gamma}$ и угловым пределом разрешения глаза $\psi_{\text{гл}}$ известной зависимостью

$$\delta = 250\psi_{\text{гл}}/\bar{\Gamma}. \quad (50)$$

С учетом выражений (48) порядковый номер разрешаемого кольца

$$m < 4 \cdot 10^{-6} r \lambda \bar{\Gamma}^2 / \psi_{\text{гл}}. \quad (51)$$

Пример. Оценим точность измерения dr/r для детали диаметром 50 мм с номинальным значением радиуса поверхности 1000 мм при измерении диаметров колец микроскопом БМИ-1Ц с видимым увеличением $\bar{\Gamma} = 15\times$. Угловой предел разрешения глаза $\psi_{\text{гл}} = 0,0006$ рад. Подсветка осуществляется дуговой разрядной лампой ДНАС-18, излучающей на длине волны $\lambda \approx 0,6$ мкм. В соответствии с зависимостью (51) разрешаемое число колец $m < 1500$. При расчете по формуле (45) получается, что в пределах диаметра детали образуется только 1040 колец, т. е. даже крайние кольца надежно разрешаются. Выбрав $m - i = 1000$, по формуле (47) получим $dr/r = 0,02\%$.

Автоколлимационный способ осуществляется с помощью автоколлимационных микроскопов и зрительных труб. Автоколлимационный микроскоп используют в основном для измерения малых радиусов кривизны вогнутых и выпуклых поверхностей (рис. 46). Измеряемую деталь 1 устанавливают в приспособление, обеспечивающее ее продольное перемещение с отсчетом по шкале 2. Иногда деталь устанавливают неподвижно, а микроскоп 3 перемещают. Погрешность отсчета перемещения детали

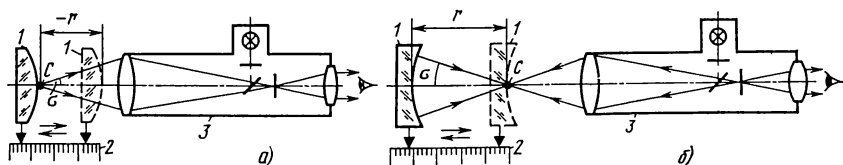


Рис. 46. Схемы измерения с помощью автоколлимационного микроскопа радиусов сферических поверхностей:

а — выпуклой; б — вогнутой

не ниже 0,001 мм, а длина перемещения должна быть не меньше значения измеряемого радиуса. Практически измерения выполняют на оптических скамьях или измерительных машинах типа ИЗМ-10М, ИЗМ-11, ИЗМ-12, ИЗМ-13.

В процессе измерений микроскоп последовательно фокусируют на измеряемую поверхность и в центр ее кривизны (рис. 46, *a*, точка *C*). В обоих случаях наблюдают резкое автоколлимационное изображение перекрестия. Разность отсчетов двух положений детали (или микроскопа) равна измеряемому радиусу кривизны r . Максимальный радиус измеряемой выпуклой поверхности не должен превышать 27 мм, так как он не может быть больше рабочего расстояния микрообъектива. Диапазон измеряемых радиусов вогнутых поверхностей ограничен лишь диапазоном перемещения детали или микроскопа. Используя ИЗМ-13, можно обеспечить перемещение $z \leq 6000$ мм, причем погрешность измерения Δz , выраженная в миллиметрах, для всех измерительных машин определяется выражением

$$\pm \Delta z = 0,001 + (z/200\,000).$$

Так как $z = r$, то погрешность измерения радиуса ввиду неточности шкалы, выраженную в микрометрах, определяют по формуле

$$dr_1 = 1 + 5 \cdot 10^{-3} r,$$

где r — измеряемый радиус кривизны, мм.

Точность фокусирования микроскопа на поверхность детали и в центр кривизны зависит от чувствительности продольной наводки, т. е. от действующей числовой апертуры рабочего пучка лучей: $\sin \sigma = D/(2r)$, где D — диаметр измеряемой детали. В целях повышения чувствительности наводки выбирают микрообъектив с апертурой, близкой к вычисленному значению. Тогда погрешность вследствие неточности продольной наводки, выполняемой дважды, мкм,

$$dr_2 = 1,6 (r/D)^2.$$

Суммарную погрешность измерения радиуса определяют выражением

$$dr = 1,6 (r/D)^2 + 5 \cdot 10^{-3} r + 1, \quad (52)$$

где числовые значения r и D выражены в мм, а dr — в мкм.

Пример. Оценим точность измерения радиуса поверхности с номинальным значением 1000 мм при диаметре детали 50 мм. По формуле (52) найдем $dr = 0,646$ мм, что соответствует относительной погрешности измерения 0,06 %. Это значение погрешности в 3 раза больше погрешности при использовании интерференционного способа.

Для измерения больших радиусов кривизны применяют автоколлимационную зрительную трубу (рис. 47), окуляр 3 которой снабжен шкалой 4 для отсчета продольных перемещений. Перед началом измерений зрительную трубу выверяют на бесконеч-

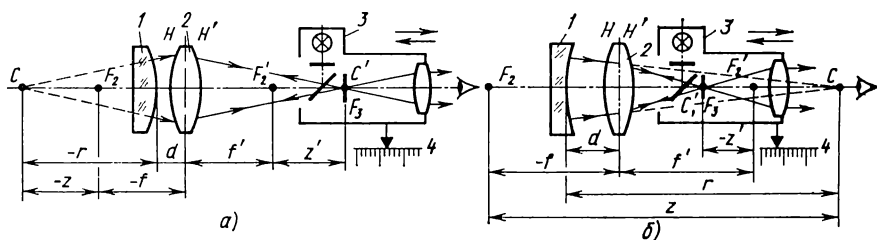


Рис. 47. Схемы измерения с помощью автоколлимационной зрительной трубы радиусов сферических поверхностей:
 а — выпуклой, б — вогнутой

ность и по шкале окуляра снимают отсчет a_1 , соответствующий совмещению заднего фокуса F'_2 объектива 2 с передним фокусом F_3 окуляра. Затем перед зрительной трубой устанавливают измеряемую деталь 1 и перемещением окуляра добиваются резкого видения автоколлимационного изображения перекрестия; по шкале окуляра снимают отсчет a_2 . Разность отсчетов $a_1 - a_2 = z'$. Зрительная труба со смещенным окуляром превращается в микроскоп с малым увеличением, сфокусированным на центр кривизны C измеряемой поверхности.

Для вывода зависимости, связывающей измеряемый радиус r с z' , рассмотрим рис. 47, а и используем формулу Ньютона $zz' = -f'^2$, где f' — фокусное расстояние объектива зрительной трубы. Тогда

$$-r = f'^2/z' + f' - d. \quad (53)$$

Для вогнутой поверхности (рис. 46, б)

$$r = -f'^2/z' - f' + d. \quad (54)$$

Для измерения этим способом необходимо знать f' объектива зрительной трубы и расстояние d между вершиной измеряемой поверхности и передней главной плоскостью объектива. При радиусах $|r| > 10$ м деталь устанавливают вблизи объектива и значением расстояния d пренебрегают. Относительная погрешность измерения r в этом случае не превышает 1 %. Погрешность вследствие неточности отсчета

$$dr = (f'/z')^2 dz'.$$

Погрешность dz' отсчета по шкале перемещений окуляра обычно меньше 0,01 мм.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕЦЕНТРИРОВКИ И КОНТРОЛЬ ЦЕНТРИРОВКИ ЛИНЗ И ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ

Децентрировкой линзы со сферическими поверхностями называется несовпадение оптической оси линзы с геометрической осью ее посадочной цилиндрической поверхности. У асфе-

рической линзы каждая из поверхностей имеет собственную оптическую ось, при децентрировке эти оси не совпадают. Поэтому для асферической линзы необходимо рассматривать децентрировку каждой поверхности относительно геометрической оси. Децентрированная линза обладает разнотолщиностью Δd по краю и клиновидностью, поэтому может быть представлена как совокупность центрированной линзы и клина с углом $\theta = \Delta d/D$, где D — диаметр линзы.

В соответствии с ГОСТ 2.412—81 децентрировку линзы со сферическими поверхностями задают позиционным допуском или допуском на форму поверхности. Позиционный допуск — это допустимое смещение центра кривизны сферической поверхности линзы с оси, определяемой базовыми поверхностями. Допуск формы заданной поверхности — наименьшее допускаемое отклонение точек реальной поверхности от номинальной относительно заданных базовых поверхностей. Фактически это допустимая разнотолщинность линзы по краю. Если линза содержит плоскую поверхность, то расположение этой поверхности определяется допуском перпендикулярности, т. е. наибольшим допустимым отклонением угла между плоскостью и базовой осью от угла 90° . Допуск на децентрировку асферической поверхности задают в виде допустимого смещения вершины этой поверхности от оси, определяемой базовыми поверхностями, причем на чертеже обязательно указывают уравнение поверхности.

Механический метод. Этот метод применяется при измерении децентрировки и при склейке линз диаметром 150 ... 200 мм со сферическими и асферическими поверхностями. Здесь используется индикаторный контактный косинометр, в котором измеряют толщину d_1 и d_2 диаметрально противоположных краев линзы или склеенной системы по нескольким сечениям и вычисляют разнотолщинность $\Delta d = d_1 - d_2$.

Оптический метод. В процессе измерения важную роль играет способ базирования линзы. Наиболее употребительно базирование с помощью устройства в виде опорного фторопластового кольца, призмы и бокового упора (см. рис. 38, б). При таком базировании нижняя поверхность линзы центрирована относительно оси прибора, а измеренная децентрировка приписывается верхней поверхности по отношению к нижней. На результат измерений влияет децентрировка нижней базировочной поверхности и овальность сечения цилиндрической поверхности. Измерения практически сводятся к определению «биения» изображения, построенного децентрированной линзой при ее вращении вокруг оси прибора. Иногда для базирования используют высокоточный трехкулачковый патрон, в котором геометрическая ось линзы совмещена с осью патрона с помощью базирования по ее цилиндрической поверхности.

При контроле центрировки серийных линз на измерительную сетку прибора наносят поле допуска, рассчитанное заранее для

линзы с определенными конструктивными параметрами. Тогда годность линз по центрировке определяется быстро и надежно.

Коллимационный способ реализуют на приборе (рис. 48), состоящем из лампы 1 с матовым стеклом 2, объектива 4 коллиматора, в фокальной плоскости которого расположена сетка 3, окуляра 10 с сеткой 8 и базирующего устройства 5, 6 для измеряемых линз 7. Зеркало 9 служит для излома оптической оси. Для увеличения чувствительности способа окуляр заменяют микроскопом. Прибор используют для измерения децентрировки положительных и отрицательных линз диаметром 70 ... 150 мм, а также при центрировке линз в процессе склейки или сборки в оправы.

Измеряемая положительная линза совместно с объективом коллиматора формирует в задней фокальной плоскости изображение A' точки A , совпадающей с центром перекрестия сетки 3. Окуляр наводят на резкое видение A' . Если измеряемая линза центрирована, то при ее вращении точка A' неподвижна. При вращении децентрированной линзы точка A' описывает в ее фокальной плоскости окружность. Так как реальные значения децентрировок линз малы, расфокусировка относительно окуляра при вращении линзы незначительна. Прибор настраивают так, чтобы его оптическая ось совпадала с осью вращения линзы, тогда центр окружности, по которой движется точка A' , совместится с центром сетки 8. Значение y , измеренное по сетке 8, равно поперечному смещению главных точек HH' линзы от оси вращения.

Значение y связано с разнотолщинностью зависимостью

$$\Delta d \approx yD/[f'(n-1)],$$

где f' — фокусное расстояние; n — показатель преломления; D — диаметр измеряемой линзы.

Измерение децентрировки отрицательных линз осуществляют совместно с центрированной положительной компенсационной линзой, при этом двухлинзовая система в целом положительна и исправлена на сферическую aberrацию. При центрировке линз в процессе склейки обеспечивают точную центрировку базовой линзы и ее соосность оси центрировочного патрона. Центрируемую линзу, диаметр которой меньше базовой, в процессе склейки

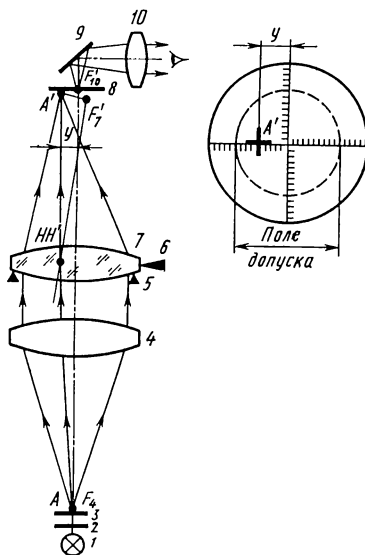


Рис. 48. Схема коллиматорного прибора для измерения децентрировки и вид поля изображения

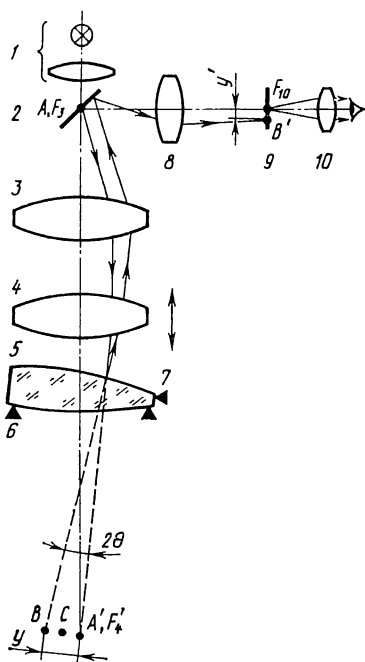


Рис. 49. Схема автоколлимационного прибора для измерения децентрировки

сдвигают в поперечном направлении и, вращая обе линзы вместе, добиваются неподвижного изображения сетки 3.

Качество центрировки линз в объективе также оценивают по виду дифракционного изображения точечной диафрагмы, которую устанавливают в коллиматорный прибор вместо сетки 3. Для наблюдения дифракционного изображения применяют микроскоп, предметная плоскость которого совмещена с фокальной плоскостью испытуемого объектива. При наличии децентрировки вместо кружка Эйри наблюдается несимметричное изображение, изменяющееся при вращении объектива.

Автоколлимационный способ основан на использовании приборов, построенных по схеме автоколлимационной трубки А. А. Забелина. В промышленности наибольшее распространение получили автоколлимационные трубки ЮС-13 и ЮС-13-2М. Их можно использо-

вать непосредственно на центрировочных станках, так как они имеют конус Морзе, который вставляется в подвижную бабку станка. Трубку ЮС-13-2М выпускают под шифром ПК-654 в комплекте со стойкой и под шифром ПК-600 со стойкой и приспособлением для базирования линз в оправе. Автоколлимационный способ применяют для контроля центрировки одиночных и склеенных линз, клиновидности клеящего слоя, перпендикулярности опорного торца линзы или оправы оптической оси линзы. Диаметры измеряемых линз в диапазоне 5 ... 70 мм. Прибор Т-198 предназначен для измерения децентрировки линз диаметром свыше 200 мм в оправе. Опорные базы измеряемых линз такие же, как при коллимационном способе.

Схема автоколлимационного прибора показана на рис. 49. Для обеспечения устойчивости измеряемой линзы 5 в базировочном устройстве 6, 7 под ней создается разреженное воздушное пространство. Осветительная система 1 освещает прозрачное перекрестие, выполненное в отражающем покрытии наклонного зеркала 2. Объектив прибора, состоящий из неподвижных компонентов 3 и 8 и подвижного компонента 4, формирует изображение перекрестия в плоскости, где расположен центр кривизны C верхней поверхности измеряемой линзы. Если линза центрирована, то

точка C лежит на оптической оси прибора. Тогда автоколлимационное изображение перекрестия, наблюдаемое на фоне сетки 9 через окуляр 10, остается неподвижным при вращении линзы вокруг оси прибора. При децентрировке линзы точка C находится вне оси прибора, поэтому лучи, отраженные от верхней поверхности линзы, выходят из точки B . Автоколлимационное изображение центра перекрестия окажется в точке B' и при вращении линзы опишет окружность, радиус y' которой измеряют по окулярной сетке 9. Смещение y изображения перекрестия, построенного лучами, отраженными от верхней поверхности линзы, связано с y' соотношением $y = y'/\beta$, где β — линейное увеличение компонентов 3, 4 и 8. Смещение y сравнивают с позиционным допуском. Если на чертеже задан допуск формы поверхности, то разнотолщинность линзы $\Delta d \approx y'D'/(2\beta r)$, где r — радиус кривизны верхней поверхности линзы.

Автоколлимационный способ приблизительно вдвое чувствительнее коллимационного, если для снятия отсчетов в обоих способах используют микроскопы одинакового увеличения.

Фотоэлектрическое устройство (рис. 50) с двумя координатными четырехплощадочными фотодиодами 6 и 10 применяется для автоматической центровки линз на центрировочных станках.

Осветительная система 2 создает равномерную освещенность в оптически сопряженных плоскостях, в которых размещены модулятор 1 и входной зрачок объектива коллиматора 3. Коллимированный пучок лучей идет к центрируемой линзе 7, установленной в регулируемом патроне 8, базирующем ее по цилиндрической поверхности. Свет, отраженный от первой поверхности линзы, направляется полупрозрачным зеркалом 4 и объективом 5 на приемную площадку фотодиода 6. Прошедший через линзу свет направляется объективом 9 на приемную площадку фотодиода 10. На обеих приемных площадках формируются световые пятна, центры которых при децентрировке линзы смещены от центра площадок.

При вращении патрона вокруг оптической оси устройства световые пятна сканируют по приемным площадкам, в результате

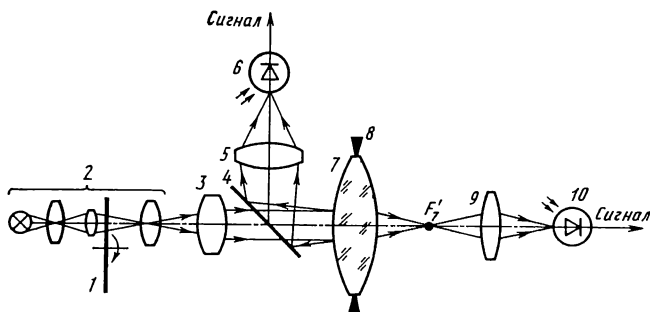


Рис. 50. Фотоэлектрическое устройство для проверки центровки линз

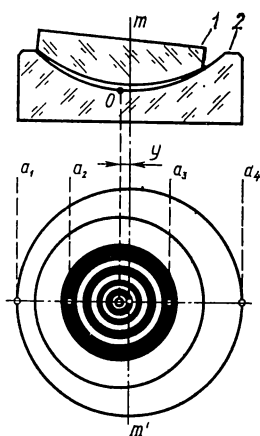


Рис. 51. Схема измерения децентрировки асферических поверхностей интерференционным способом

индикатор, позволяющий замерять значение децентрировки линзы, если патрон строго центрирован. Самый миниатюрный регулируемый патрон снабжен пьезоэлектрическими толкателями и обеспечивает перемещения линзы в диапазоне нескольких десятков микрометров с точностью 3 мкм. Коллимационный и автоколлимационный способы пригодны только для линз со сферическими и плоскими поверхностями.

Интерференционный способ измерения децентрировки, предложенный В. Г. Зубаковым, применим только для асферических поверхностей. Он позволяет измерять смещение вершины O поверхности с геометрической оси mm' детали (рис. 51). Способ заключается в наложении на измеряемую поверхность детали 2 сферического пробного стекла 1.

Пробное стекло самоустанавливается на измеряемой поверхности, в воздушном промежутке возникает кольцевая интерференционная картина. Децентрировку поверхности определяют по значению смещения центра колец относительно центра поперечного сечения цилиндрической поверхности детали. Для повышения контраста интерференционной картины освещение осуществляют спектральной лампой со светофильтрами. Измерение смещения центров колец выполняют с помощью измерительных микроскопов типа УИМ или БМИ (см. рис. 45) или горизонтального компаратора ИЗА-2 по нескольким сечениям поверхности в целях определения максимального смещения вершины асферической поверхности с геометрической оси детали. Биссектор микроскопа наводят последовательно на край детали, на диаметрально противоположные стороны выбранного интерференционного кольца и на другой край детали. При этом по шкале

чего выходные сигналы U_x и U_y не равны нулю. Эти сигналы поступают на усилитель, а затем на привод центрировочного патрона или на индикатор. При автоматической центровке линза юстируется в патроне до поступления нулевых сигналов с обоих фотодиодов. Нулевые сигналы соответствуют симметричному расположению световых пятен относительно центров площадок, а следовательно, совпадению оптической оси линзы с осью вращения патрона. Если нулевой сигнал поступает только с фотодиода 6, то это свидетельствует об отсутствии децентрировки первой поверхности относительно оси ее цилиндрической поверхности. Сигнал с фотодиода 10 в этом случае указывает на децентрировку второй поверхности относительно первой. Выходные сигналы также могут быть выведены на

микроскопа снимают отсчеты a_1 , a_2 , a_3 и a_4 , а децентрировку вычисляют по формуле

$$y = 0,5 [(a_1 - a_2) - (a_3 - a_4)].$$

На точность измерений в данном случае влияют астигматизм, эксцентричность отдельных зон измеряемой поверхности, низкий контраст интерференционной картины, овальность поперечного сечения цилиндрической поверхности и недостаточное термостатирование системы деталь—пробное стекло. Астигматизм и эксцентричность зон исключаются посредством снятия отсчетов a_2 и a_3 в различных зонах поверхности. Для снятия отсчетов выбирают наиболее узкие и контрастные кольца. Овальность сечения цилиндрической поверхности исключают из результатов измерений после замеров диаметра детали по нескольким сечениям. Погрешность измерения децентрировки вершины для различных типов асферических поверхностей не превышает 5 мкм.

Интерференционный способ применяют также при центрировке линзовых систем в процессе сборки (рис. 52). Поверхности линз могут быть сферическими и асферическими. Схема Д. Д. Максутава (рис. 52, а) включает спектральную лампу 1 и белый экран 2 с отверстием диаметром 2 ... 5 мм посередине и черным перекрестием, начерченным на стороне экрана, обращенной к центрируемой линзовой системе 3, 4. Экран устанавливают так, чтобы изображения перекрестий, полученные при отражении лучей от поверхностей линз 3 и 4 и наблюдаемые через отверстие в экране, были совмещены между собой. Кроме изображений перекрестий, наблюдатель видит кольцевую интерференционную картину, возникшую в результате взаимодействия волновых фронтов, отраженных от поверхностей, разделенных тонким воздушным промежутком. Несовпадение центра изображений перекрестий с центром интерференционных колец свидетельствует о клиновидности воздушного зазора между линзами 3 и 4.

Использование лазера [13] позволяет значительно расширить диапазон применения способа (рис. 52, б). Практически парал-

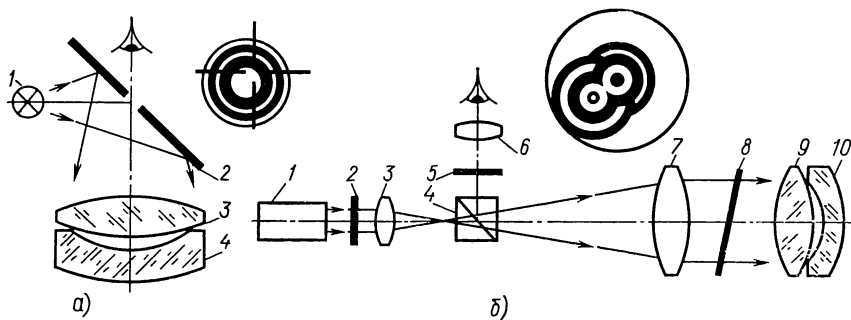


Рис. 52. Схемы устройств для центрировки линзовых систем интерференционным способом:

а — схема Д. Д. Максутава; б — схема с применением лазера

лельный пучок лучей, выходящий из гелий-неонового лазера 1, расширяется телескопической системой 3, 7 и направляется на центрируемую систему 9, 10. Вследствие высокой степени когерентности лазерного излучения волновые фронты, отраженные от поверхностей линз, интерферируют между собой, даже если поверхности расположены на значительном расстоянии одна от другой. Результат интерференции наблюдают в микроскоп малого увеличения, включающий объектив 7, окуляр 6 и светоделительный куб 4. При совпадении оптических осей линз 9 и 10 с осью падающего лазерного пучка видны концентрические интерференционные кольца. Если одна из линз децентрирована, то картина имеет вид, показанный в верхней части рис. 52, б.

Для устранения из поля зрения системы света, отраженного от поверхностей куба 4 и объектива 7 и создающего «паразитные» интерференционные картины, применяют поляризаторы 2 и 5 совместно с фазовой четвертьволновой пластинкой 8. Принцип действия этой поляризационной системы заключается в следующем: линейно поляризованный свет, выходящий из поляризатора 2, превращается пластинкой 8 в циркулярно поляризованный. Свет после отражения от поверхностей линз 9 и 10 и взаимодействия с пластинкой 8 в обратном ходе лучей вновь превращается в линейно поляризованный, но плоскость поляризации отраженного света перпендикулярна плоскости поляризации входящего. Плоскость поляризации света, отраженного от поверхностей линз объектива 7 и куба 4, остается параллельной плоскости поляризации входящего света. Поляризатор 5 ориентирован на пропускание света, отраженного от поверхностей линз 9 и 10 и одновременное гашение «паразитного» света.

4. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ УГЛОВ ПРИЗМ, КЛИНЬЕВ И КЛИНОВИДНОСТИ ПЛАСТИН

В оптических приборах широко используют отражательные и преломляющие призмы, оптические клинья и многогранники. Все эти детали образованы плоскими преломляющими и отражающими поверхностями, расположенными под различными углами одна к другой. Ребра между рабочими гранями призм, разворачивающихся в плоскопараллельные пластины, должны быть параллельны между собой, их непараллельность приводит к пирамидальности призм. На чертежах призм задают предельные отклонения углов $\Delta\theta$, предельную разность одинаковых углов δ и допустимую пирамидальность π , причем указанные отклонения обычно составляют несколько угловых секунд или минут. При контроле призм и клиньев измеряют не только углы между их гранями, но и углы отклонения лучей, прошедших через эти детали.

На рабочих чертежах плоскопараллельных пластин задают допуск на клиновидность θ , который определяет допустимую непараллельность между рабочими гранями пластины. Неточно изготовленная пластина практически является клином с малым преломляющим углом θ . Поэтому способы контроля пластин могут быть идентичны способам контроля оптических клиньев.

Механический метод. Для измерения углов на стадии шлифования призм в основном применяют контактные инструменты: регулируемый угольник, механический и оптический угломеры, длиномер, косиномер.

Регулируемый угольник и угломеры снабжены двумя металлическими линейками, одна из которых неподвижна и выполняет роль основания, а другая вращается. Угольник не имеет шкалы, поэтому определенный угол между линейками устанавливают по оптическим угольникам, которые обычно имеют углы 30, 45, 60 и 90°, выполненные с допуском 10 ... 30". Угол детали сравнивается с установленным углом между линейками угольника. Погрешность в оценке отклонения угла зависит от длины грани детали и составляет 1 ... 5'.

Угломеры имеют шкалу, по которой отсчитывают поворот подвижной линейки. В механическом угломере есть неподвижная шкала и нониус, соединенный с подвижной линейкой. Оптический угломер УО-2 снабжен лимбом и лупой, через которую снимают отсчет поворота линейки. Для измерения угла деталь одной из граней устанавливают на неподвижную линейку, а подвижную линейку совмещают с другой гранью. Угломеры обеспечивают измерения с точностью 2,5' в диапазоне углов 0 ... 180°.

Оптический метод. Наиболее удобным оборудованием для измерения углов оптическим методом являются гониометры и оптические скамьи (см. гл. 1). Оптический метод включает коллимационный, автоколлимационный и интерференционный способы с визуальной или фотоэлектрической регистрацией. Неплоскостность граней призмы и низкая чистота их обработки существенно снижает надежность измерений.

Коллимационный способ измерения углов призм реализуют на гониометре по схемам, приведенным на рис. 53.

По схеме, приведенной на рис. 53, а, призму 1 базируют на неподвижном столе 2 гониометра так, чтобы ребро измеряемого угла θ разделяло приблизительно пополам пучок лучей, выходящий из коллиматора 3. Затем зрительную трубу 4 последовательно устанавливают так, чтобы изображение A' щели коллиматора A , построенное при отражении лучей от рабочих граней призмы, совместилось с вертикальным штрихом сетки зрительной трубы. Угол $\theta = (a_1 - a_2)/2$, где a_1 и a_2 — отсчеты по лимбу гониометра.

По схеме, приведенной на рис. 53, б, зрительную трубу 4 устанавливают так, чтобы ее оптическая ось составляла минимально возможный угол ϕ с осью коллиматора 3, и закрепляют

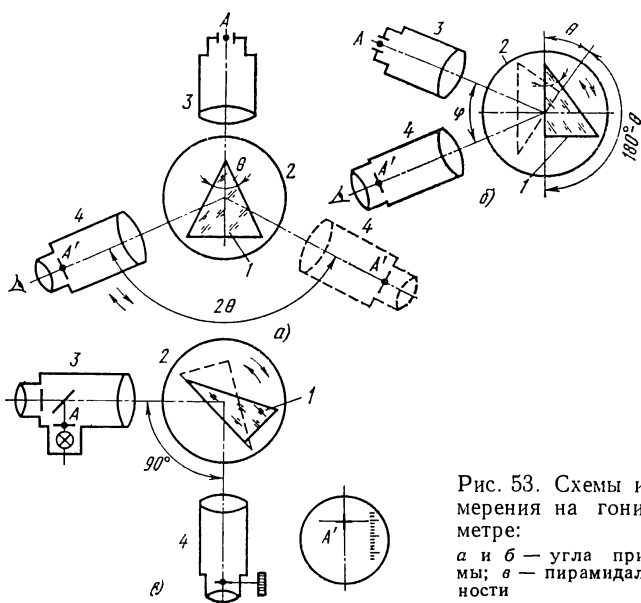


Рис. 53. Схемы измерения на гониометре:

а и б — угла призмы; в — пирамидальности

неподвижно. Призму 1 базируют на вращающемся столе 2 и поворотом столика с призмой последовательно добиваются совмещения изображения щели коллиматора с вертикальным штрихом сетки зрительной трубы. Угол $\theta = 180^\circ - (a_1 - a_2)$, где a_1 и a_2 — отсчеты по лимбу гониометра.

Погрешность угловых измерений определяется маркой выбранного гониометра и при использовании высокоточного гониометра ГС-1М не превышает 1". Кроме того, неперпендикулярность рабочих граней призмы плоскости стола вносит погрешность в измерения.

Пирамидальность призм измеряют на гониометре (рис. 53, в), в коллиматоре 3 которого вместо щели установлен автоколлимационный окуляр. Зрительная труба 4 снабжена окулярным микрометром, измерительную шкалу которого располагают вертикально. Призму 1 помещают на вращающийся стол 2 так, чтобы одно из ребер призмы было параллельно оси вращения стола. Коллиматор и зрительную трубу устанавливают под углом 90° . Поворачивая стол с призмой вокруг вертикальной оси, последовательно добиваются таких положений рабочих граней призмы, при которых изображения A' центра перекрестия A , полученные при отражении от этих граней, совпадут с вертикальным штрихом сетки окулярного микрометра (справа показаны изображение перекрестия и шкала). Если призма пирамидальна, то эти изображения будут находиться на разной высоте. Совместив горизонтальный штрих сетки окулярного микрометра с центром каждого изображения, снимают отсчеты a_1 и a_2 . Разность отсчетов $a_1 -$

$a_2 = \gamma$, где γ — угол отклонения лучей вследствие пирамидальности. Угол пирамидальности π связан с углом γ зависимостью: $\pi = \gamma/\sqrt{2}$.

Погрешность измерения пирамидальности зависит от погрешности установки угла 90° и погрешности отсчета угла γ по шкале окулярного микрометра. При использовании гониометра ГС-1М и окулярного микрометра, цена деления которого в угловой мере составляет $1''$, погрешность измерения пирамидальности не более $1,2''$.

Обычно призмы и оптические клинья предназначаются для отклонения проходящего через них пучка на заданный угол. Поэтому при аттестации этих деталей измеряют угол отклонения ω . Большие углы отклонения измеряют на гониометре, а малые (до 1°) можно измерить на оптической скамье.

Измерение и контроль углов отклонения отражательных призм на гониометре выполняют по схеме, приведенной на рис. 54, а. Сначала совмещают оптическую ось зрительной трубы 4, снабженной автоколлимационным окуляром, с осью коллиматора 1 и по лимбу снимают отсчет a_1 . Затем на стол 2 гониометра устанавливают измеряемую призму 3 так, чтобы ее выходная грань была перпендикулярна к оси зрительной трубы (проверка по автоколлимации лучей от этой грани). После этого вращают стол и зрительную трубу как единое целое, разворачивая их до совмещения вертикального штриха перекрестия трубы с изображением щели коллиматора. По лимбу снимают отсчет a_2 . Угол отклонения $\omega = a_1 - a_2$.

Если призма имеет нечетное число отражающих граней, то неперпендикулярность ее к выходной грани оси зрительной трубы существенно влияет на результат измерений. При четном числе отражающих граней погрешность установки призмы мало влияет на результат измерений, так как угол отклонения равен удвоенному углу между отражающими гранями и не зависит от угла входа лучей в призму. Погрешность разности отсчетов угловых положений зрительной трубы зависит от марки гониометра.

Углы отклонения клиньев измеряют на гониометре аналогичным способом. Клины (рис. 54, б) устанавливают на стол гониометра так, чтобы его входная грань MP была перпендикулярна к оси коллиматора. Так как угол отклонения клина зависит от длины волны используемого света, щель коллима-

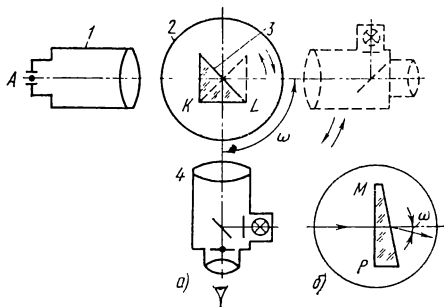


Рис. 54. Схемы измерения на гониометре углов отклонения:

а — призмы; б — клина

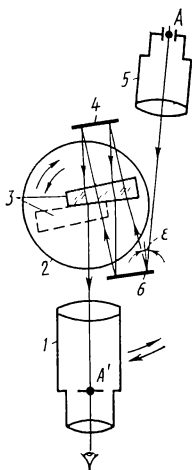


Рис. 55. Схема измерения на гониометре угла отклонения клина при многократном прохождении через него пучка лучей

лиматора. При этом по лимбу снимают отсчет a_1 . Затем стол с клином разворачивают на 180° и, вновь совместив вертикальный штрих сетки с изображением щели, по лимбу снимают отсчет a_2 . Угол отклонения $\omega = (a_1 - a_2)/(2m)$, где m — число прохождений светового пучка через клин.

При использовании одного и того же гониометра погрешность измерения угла ω по схеме, приведенной на рис. 55, в несколько раз меньше погрешности измерения угла ω по схеме, изображенной на рис. 54, б. Увеличение числа m приводит к уменьшению погрешности. Например, для гониометра ГС-5 в этом случае погрешность $d\omega = 0,2''$, тогда как измерения по схеме рис. 54, б выполняются с погрешностью $d\omega = 5''$.

Коллимационный способ рационально использовать для измерения углов отклонения клиньев, преломляющие углы которых $\theta < 10'$. В этом случае удастся достигнуть большого числа прохождений светового пучка. Очевидно, что способ применим для контроля клиновидности плоскопараллельных пластин.

Углы отклонения клиньев измеряют также на оптической скамье (рис. 56). Коллиматор 1 со щелью и зрительную трубу 3,

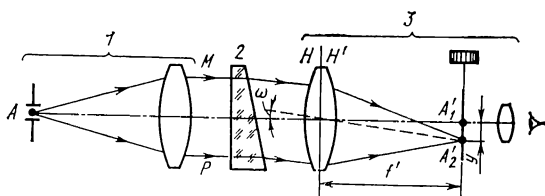


Рис. 56. Схема измерения угла отклонения клина на оптической скамье

снабженную окулярным микрометром, устанавливают соосно. Тогда изображение A'_1 точки A расположено на оси системы. Затем между объективами коллиматора и зрительной трубы помещают измеряемый клин 2. При этом изображение A'_2 точки A смещается на расстояние y , измеряемое окулярным микрометром. Угол отклонения $\omega = \text{arctg}(y/f')$, где f' — фокусное расстояние объектива зрительной трубы. Учитывая, что для клиньев угол $\omega < 6^\circ$, можно использовать формулу $\omega = y/f'$.

Предельную относительную погрешность измерения угла ω вычисляют по формуле

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{dy}{y} + \frac{df'}{f'}.$$

Пример. Вычислим погрешность измерения угла отклонения с номинальным значением $\omega = 30'$ на оптической скамье типа ОСК. Фокусное расстояние зрительной трубы $f' = 430$ мм известно с точностью $df'/f' = 0,2\%$. Смещение изображения щели в этом случае $y = 3,77$ мм, при измерении окулярным микрометром $dy = 0,01$ мм. Тогда в соответствии с приведенными формулами $d\omega = 4 \cdot 10^{-5}$ рад $= 8''$, $d\omega/\omega = 0,45\%$. Очевидно, что с помощью гониометров ГС-5 или ГС-1М обеспечивается более высокая точность измерения углов ω . Например, абсолютная погрешность измерения угла ω по схеме, изображенной на рис. 54, б, на гониометре ГС-1М составит $1''$.

Оптико-электронная углоизмерительная система, предложенная Ю. Г. Якушенковым (рис. 57), предназначена для контроля клиновидности пластин с углами $\theta \leq 20''$. Средняя квадратическая погрешность измерения $d\theta = 0,3''$. В системе используется коллимационный способ измерения и фотоэлектрический прием выходного сигнала.

Световой поток от источника 1 проходит через модулятор 2, коллиматор 3, контролируемую пластину 4 и фокусируется объективом 5 в плоскости ребра зеркальной призмы-анализатора 8. Перед анализатором установлена телескопическая линза 6, выполняющая роль компенсатора углового отклонения лучей, которое возникает вследствие клиновидности пластины. Телескопическая линза перемещается в направлении, перпендикулярном к оптической оси системы. Значение ее перемещения отсчитывают по шкале 12, увеличенное изображение которой проецируется

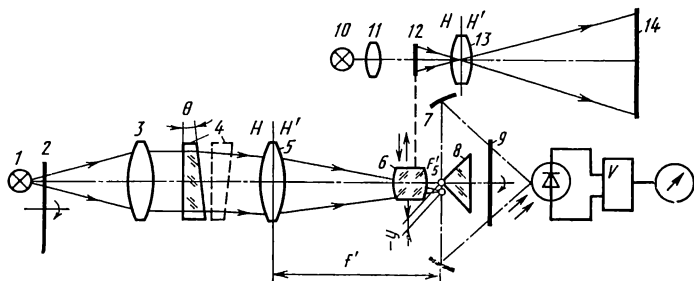


Рис. 57. Схема оптико-электронной углоизмерительной системы

объективом 13 на экран 14. Лампа 10 и конденсор 11 служат для освещения шкалы.

Призма-анализатор разделяет световой поток на два, которые сферическими зеркалами 7 направляются на фотодиод. Обтюратор 9 попеременно пропускает эти потоки. Если значения обоих потоков равны между собой, то амплитуда фототока на частоте обтюрации равна нулю. При неравенстве потоков сила фототока пропорциональна их разности, т. е. значению поперечного смещения y центра светового пятна, которое сформировано в плоскости ребра анализатора. Угол $\theta = y/[f'(n - 1)]$, где f' — фокусное расстояние объектива 5; n — показатель преломления пластины. Фототок усиливается усилительно-преобразующим трактом V , и его значение фиксируется индикатором.

Перед началом измерений систему настраивают так, чтобы показание на индикаторе было равно нулю. Измеряемую пластину 4 последовательно устанавливают в две позиции (см. рис. 57). При наличии клиновидности показание на индикаторе в обоих случаях будет отличным от нуля. Тогда поперечным перемещением телескопической линзы добиваются такого сдвига светового пятна, чтобы $y = 0$. При этом показание на индикаторе становится нулевым. По шкале 12 снимают отсчеты a_1 и a_2 , соответствующие поперечному сдвигу телескопической линзы, который компенсирует отклонение лучей, вызванное клиновидностью пластины при двух ее позициях. Шкала 12 градуирована в угловой мере, цена деления шкалы $0,1''$. Угол клиновидности $\theta = (a_1 - a_2)/[2(n - 1)]$.

Автоколлимационный способ измерения углов призм и клиньев реализуют на гониометрах, оптических скамьях и с помощью автоколлиматоров типа АК-У, МГА или АФ-1Ц.

Для равнобедренных призм разработан способ одновременного измерения погрешностей, углов и пирамидальности. Способ осуществляют с помощью автоколлимационной зрительной трубы (рис. 58).

Погрешность прямого угла и пирамидальность измеряют по схеме, приведенной на рис. 58, а. Призму 1 устанавливают так,

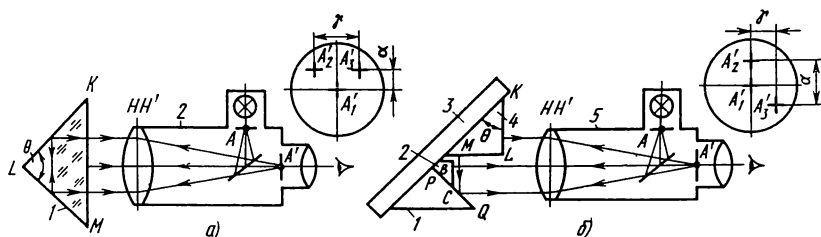


Рис. 58. Схемы одновременного измерения пирамидальности и угловых погрешностей равнобедренных призм:

а — при известном показателе преломления призмы; б — с использованием вспомогательных призм

чтобы ее гипотенузная грань была перпендикулярна к оси зрительной трубы 2. Наблюдатель видит, как минимум, три автоколлимационных блика. Блик A'_1 образован в результате однократного отражения лучей от грани KM , и может быть установлен в центре поля. Яркие блики A'_2 и A'_3 возникают вследствие двукратного отражения лучей от граней ML и KL .

При отсутствии пирамидальности все блики располагаются на одной прямой. Смещение бликов A'_2 и A'_3 относительно A'_1 является мерой пирамидальности $\pi = \alpha/(2n)$, где α — относительное вертикальное смещение бликов, выраженное в угловой мере; n — показатель преломления призмы.

Погрешность прямого угла призмы определяют по значению смещения бликов A'_2 и A'_3 относительно друг друга. Если прямой угол выдержан абсолютно точно, то оба блика совмещены. Расстояние γ между ними, выраженное в угловой мере, связано с погрешностью прямого угла зависимостью $\Delta\theta = \gamma/(4n)$. Важно отметить, что γ не зависит от ориентации призмы относительно оси зрительной трубы. При вращении призмы вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, блики A'_2 и A'_3 остаются неподвижными, так как они образовались при четном числе отражений.

Для измерений по схеме, приведенной на рис. 58, б, нет необходимости знать значение показателя преломления призмы, так как световые пучки, создающие автоколлимационные блики, не проходят сквозь призму. По этой схеме одновременно измеряют разность одинаковых углов $\theta = 45^\circ$ и пирамидальность. Измеряемую призму 4 прижимают гипотенузной гранью к стеклянной пластине 3. На пластине установлены две вспомогательные призмы 1 и 2 с зеркальными гранями PQ и BC . Грань PQ перпендикулярна к опорной плоскости пластины. Грань BC параллельна ребру двугранного прямого угла, а угол между гранями BC и PQ равен 135° . Ось автоколлимационной зрительной трубы 5 устанавливают перпендикулярно к грани BC .

Пучок лучей, выходящих из трубы 5, делится по площади на три части. Автоколлимационный блик A'_1 от грани BC расположен в центре поля. В результате последовательного отражения лучей от граней PQ , ML и вновь от PQ образуется блик A'_2 . Лучи, отраженные от грани KL , формируют блик A'_3 . При вращении призмы 4 вокруг оси, перпендикулярной к ее гипотенузной грани, блики A'_2 и A'_3 перемещаются в горизонтальном направлении. Вращая призму, ее устанавливают так, чтобы автоколлимационный блик A'_2 совпал с вертикальным штрихом сетки зрительной трубы и замеряют в угловой мере расстояния γ и α . Разность одинаковых углов $\delta \approx \alpha/2$, а пирамидальность $\pi \approx \gamma/(4 \cos \theta)$.

Неточность изготовления плоской поверхности пластины, а также отклонения углов вспомогательных призм вносят погрешности в измерении. Значения этих погрешностей оценивают по формулам $d\delta \approx 2\varphi$ и $d\pi \approx 2\varphi \cos \theta$, где φ — погрешность пря-

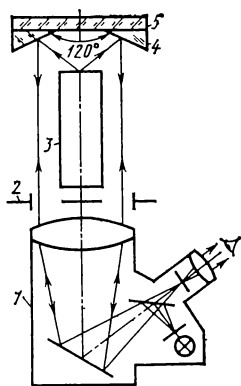


Рис. 59. Схема автоколлимационного прибора АКП-400

мого угла между опорной плоскостью пластины и гранью PQ ; φ — погрешность угла 0° между гранью BC и ребром двугранного угла.

Клиновидность непрозрачных стержней и пластин с неизвестным показателем преломления измеряют автоколлимационным прибором АКП-400 (рис. 59), который состоит из автоколлиматора 1, диафрагмы 2 и отражателя, состоящего из двух призм 4, приклеенных к пластине 5. Отражатель имеет зеркальное покрытие. Перед измерениями ось автоколлиматора устанавливают перпендикулярно к поверхности пластины 5. Измеряемый стержень 3 закрепляют между отражателем и диафрагмой и закрывают нижний торец

стержня. В этом случае наблюдают автоколлимационный блик от верхнего торца стержня. По шкале окулярного микрометра автоколлиматора снимают отсчет a_1 , соответствующий его положению. Затем диафрагмой экранируют лучи, идущие к отражателю, одновременно открывая нижний торец стержня. При этом снимают отсчет a_2 , соответствующий положению автоколлимационного блика от нижнего торца. Клиновидность $\theta = (a_1 - a_2)/2$.

Максимальная длина измеряемых стержней 400 мм, погрешность измерения клиновидности 4 ... 5".

Интерференционный способ применяют для измерения и контроля углов клиньев и призм. Он обеспечивает высокую чувствительность и точность.

Для измерения углов клиньев и клиновидности пластин используют микроскоп типа УИМ или БМИ с осветителем (см. рис. 45). Измеряемый клин устанавливают на предметный стол 8 микроскопа. В результате интерференции лучей, отраженных от поверхностей клина, возникают интерференционные полосы равной толщины, параллельные ребру клина. Клин ориентируют так, чтобы полосы были перпендикулярны к направлению движения стола. Ширину полосы b измеряют перемещением стола до совмещения центра перекрестия микроскопа с серединами двух соседних полос. Угол клина $\theta = \lambda / (2nb)$, где λ — длина волны света; n — показатель преломления клина.

Основную погрешность в результате измерений вносит погрешность измерения ширины полосы. Для уменьшения этой погрешности измеряют суммарную ширину y нескольких полос, тогда ширина полосы $b = y/N$, где N — число полос. Продифференцировав эту формулу, получим выражение для определения погрешности измерения ширины полосы: $db = dy/N$, где $dy = db$ — погрешность наведения центра перекрестия на середину полосы. Относительная погрешность измерения угла клина, воз-

никающая вследствие погрешности наведения, определяется выражением $d\theta/\theta = db/Nb$.

Учитывая, что наводку на середину полосы обычно осуществляют с погрешностью 0,1 ее ширины, причем наводку выполняют дважды, $db/b = 0,2$. Тогда последнее выражение примет вид $d\theta/\theta = 0,2N$. Очевидно, что для повышения точности измерений необходимо увеличивать N . Если $N = 100$, то $d\theta/\theta = 0,2\%$.

Снижение точности измерений может быть вызвано искривлением интерференционных полос вследствие неплоскостности поверхностей клина и неоднородности стекла.

В процессе измерений важно не только определить клиновидность пластины, но и выявить положение ребра и основания клина. По полосам равной толщины это сделать невозможно. Преимущество применения колец равного наклона заключается в том, что они позволяют определить не только значение, но и знак изменения толщины пластины. В этом случае используют интерферометры, в которых на испытуемую пластину падает сходящийся пучок лучей (рис. 60). Точечная диафрагма 3 освещена монохроматическим светом от источника излучения 1 через светофильтр 2. Изображение диафрагмы проецируется объективом 4 и полупрозрачным зеркалом 8 на поверхность испытуемой пластины 9, помещенной на подвижный стол 10. Перемещение стола измеряют по шкале 11. Лучи, отраженные от верхней и нижней поверхностей пластины, интерферируют между собой, образуя кольца равного наклона, локализованные в бесконечности. Интерференционную картину рассматривают через зрительную трубу, включающую объектив 7, окуляр 5 и сетку 6.

Перед началом измерений пластину ориентируют таким образом, чтобы ребро возможного клина располагалось вдоль щели (перпендикулярно к плоскости чертежа). При такой ориентации достигается наилучший контраст колец. Перемещая стол, наблюдают за состоянием интерференционной картины. Если кольца стягиваются к центру картины и исчезают в нем (порядок интерференции убывает), то толщина пластины уменьшается. Если кольца увеличиваются и из центра картины появляются новые (порядок интерференции возрастает), то толщина увеличивается. Подвижная нить сетки служит для определения смещения полос с точностью до 0,1 ширины полосы.

Пусть при перемещении пластины на расстояние y , определя-

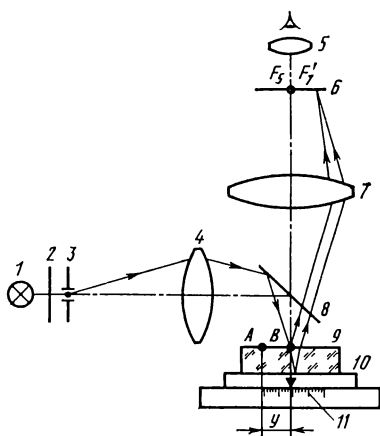


Рис. 60. Схема интерферометра для измерения клиновидности пластин

емое по шкале, возникло или исчезло N колец. Это свидетельствует об изменении порядка интерференции: $N = m - i$, где m и i — порядки интерференции при отражении лучей от зон A и B . Условия максимумов интерференции для этих зон выражают зависимостями: $2nd_A = m\lambda$ и $2nd_B = i\lambda$, где d_A и d_B — толщины зон A и B ; n — показатель преломления пластины. Разнотолщинность $\Delta d = d_A - d_B = \lambda (m - i)/(2n)$, поэтому $\Delta d = N\lambda/(2n)$.

Угол клина пластины $\theta = N\lambda/(2ny)$. Метод обеспечивает высокую чувствительность к изменению толщины пластины.

Пример. Изменение порядка интерференции на $N = 0,1$ при контроле пластины с показателем преломления $n = 1,5$ с применением излучения с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм указывает на изменение толщины $\Delta d = 0,02$ мкм. Если при этом $y = 10$ мм, то угол клина $\theta = 0,4''$.

Основные погрешности измерения обусловлены неплоскостностью поверхностей пластины и «плавной» неоднородностью стекла. Поэтому перед измерениями обязательно проверяют плоскостность поверхностей.

ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1. ВИДЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Под оптической поверхностью обычно понимают границу раздела двух сред с различными показателями преломления. К оптическим поверхностям относятся внешние поверхности линз, призм, зеркал и других оптических деталей, граничащих с воздухом, а также поверхности склейки двух линз с различными показателями преломления. Речь идет о полированных поверхностях оптических деталей, микронеровности которых значительно меньше длины волны света. Действие оптической поверхности сводится к изменению формы падающего на нее волнового фронта, т. е. к изменению направления хода лучей. Очевидно, что оптическая поверхность является основным и наиболее ответственным элементом приборов, формирующих высококачественное оптическое изображение.

Качество оптических поверхностей почти всегда является решающим фактором, определяющим качество всего прибора в целом. Под качеством формы поверхности понимают соответствие изготовленной поверхности ее теоретическому виду. Для высокоточных оптических поверхностей допустимое отклонение действительной формы от ее теоретического вида исчисляется долями длины волны света, т. е. десятыми и сотыми долями микрометра. Выявить эти отклонения, определить их характер и значение — основная цель контроля, без которого невозможно изготовление оптических деталей и, следовательно, приборов.

Наибольшее применение в оптических приборах находят сферические поверхности, так как технология их изготовления наиболее проста по сравнению с технологией других видов поверхностей. Плоская поверхность является частным случаем сферической поверхности с бесконечно большим радиусом кривизны. Сферические и плоские поверхности являются частным случаем более сложных видов поверхностей — асферических, т. е. не имеющих сферической формы. Среди асферических поверхностей (АП) наибольшее распространение получили осесимметричные поверхности, которые традиционно делят на поверхности второго и высших порядков.

В расчетах оптических систем, как правило, начало прямоугольных координат X , Y , Z совмещают с вершиной поверхности, а ось симметрии поверхности — с оптической осью Z , причем

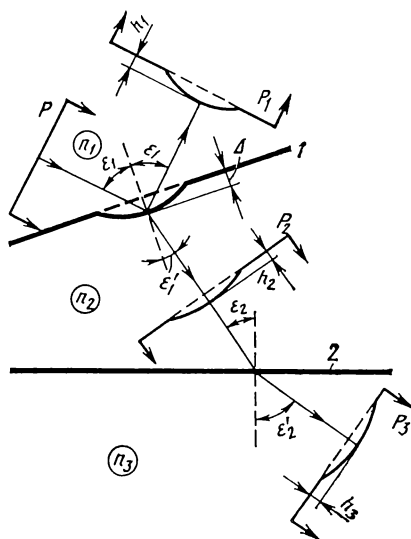


Рис. 61. Деформация плоского волнового фронта при преломлении и отражении от плоских поверхностей

уравнение меридиональной кривой АП используют в двух видах:

$$y^2 = a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n; \quad (55)$$

$$z = A_1 y^2 + A_2 y^4 + \dots + A_n y^{2n}. \quad (56)$$

Для всех поверхностей второго порядка уравнение меридиональной кривой имеет вид

$$y^2 = 2r_0 z + (\epsilon^2 - 1) z^2, \quad (57)$$

где ϵ — эксцентриситет кривой второго порядка: $\epsilon = 0$ соответствует сферической поверхности, $\epsilon = 1$ — параболической, $\epsilon > 1$ — гиперболической, $0 < \epsilon < 1$ — эллиптической поверхности, образованной вращением эллипса вокруг большой оси.

Если в уравнение (57) формально ввести $\epsilon^2 < 0$, то получим уравнение эллипса, малая ось которого совмещена с осью Z .

Требования к качеству оптических поверхностей зависят от условий их применения; их назначают в каждом конкретном случае по-разному. Однако можно указать на типовые условия применения поверхностей и основные требования, которые к ним предъявляют. Д. Д. Максотов [9] указал общий прием анализа влияния погрешностей поверхностей на деформацию волнового фронта, отраженного или преломленного анализируемой поверхностью.

Пусть плоские поверхности 1 и 2 (рис. 61) разделяют оптические среды с показателями преломления n_1, n_2 и n_3 , причем $n_1 < n_2 > n_3$. Лучи света, образующие плоский волновой фронт P , падают на поверхность 1 под углом ϵ_1 , причем на поверхности 1 имеется местная погрешность (яма) глубиной Δ . Очевидно, что отраженный волновой фронт P_1 и преломленный P_2 окажутся деформированными. Используя законы геометрической оптики, найдем значения деформаций волновых фронтов P_1 и P_2 :

$$h_1 = 2\Delta \cos \epsilon_1; \quad (58)$$

$$h_2 = \frac{\Delta}{n_2} \left(\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \epsilon_1} - n_1 \cos \epsilon_1 \right). \quad (59)$$

Волновой фронт P_2 после преломления на недеформированной поверхности 2 также окажется деформированным на значение

$$h_3 = h_2 \frac{n_2}{n_3} = \frac{\Delta}{n_3} \left(\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \epsilon_1} - n_1 \cos \epsilon_1 \right). \quad (60)$$

Рассмотрим частные, но важные в практическом отношении случаи, вытекающие из формул (58)—(60). При нормальном падении лучей ($\varepsilon_1 = 0$) на отражающую поверхность погрешности последней переносятся на волновой фронт, как следует из формулы (58), в удвоенном масштабе, т. е. $h_1 = 2\Delta$. При больших углах падения ε_1 , близких к прямому ($\cos \varepsilon_1 \rightarrow 0$), значение $h_1 \rightarrow 0$. Этим объясняется тот факт, что при больших углах падения зеркальное отражение возможно не только от полированных, но и от шероховатых (матовых) поверхностей. При нормальном падении лучей на плоскопараллельную пластину, одна из поверхностей которой имеет погрешность Δ (бугор или яму), выходящий волновой фронт деформирован на значение $h_3 = \Delta (n - 1)$. Если на поверхности склейки двух поверхностей, разделяющих среды с показателями преломления n_1 и n_2 , имеется погрешность Δ , то деформация волнового фронта, проходящего через поверхность склейки, будет равна $h_2 = \Delta (n_2 - n_1)/n_2$. Наибольшую деформацию волнового фронта вызывают погрешности внутренних поверхностей с «глухим» зеркальным покрытием. Например, при нормальном падении лучей на плоскопараллельную пластину, на внутреннюю поверхность которой нанесено зеркальное покрытие, деформация отраженного волнового фронта составит $2n\Delta$, где n — показатель преломления пластины; Δ — значение погрешности зеркальной поверхности пластины.

Из приведенных рассуждений видно, что в зависимости от оптических свойств поверхности погрешности ее формы влияют на волновой фронт в очень широких пределах. Например, при одном и том же значении погрешности поверхности склейки двух оптических деталей и погрешности внутренней зеркальной поверхности вызывают деформации волнового фронта, отличающиеся в 30 раз и более. Поэтому опасно не значение погрешности формы поверхности, а деформация волнового фронта, обусловленная ее оптическим действием. Исходя из этого назначают требования к качеству оптических поверхностей.

Наивысшие требования обычно предъявляют к астрономическим зеркалам: допустимое отклонение реальной поверхности зеркала от ее теоретической формы не должно превышать, как правило, десятых и сотых долей длины волны видимой области спектра (0,05 ... 0,1 мкм). Такие же высокие требования предъявляют к ответственным оптическим деталям микрообъективов и интерферометров (зеркалам и светоделителям), а также к эталонным поверхностям пробных стекол.

К внешним (граничащим с воздухом) оптическим поверхностям всегда предъявляются более высокие требования, чем к внутренним (склеенным) поверхностям. Допуски на форму оптических поверхностей назначает, как правило, оптик-вычислитель, отвечающий за обеспечение нужных характеристик качества оптической системы прибора в целом.

В большинстве случаев оптические поверхности имеют осесимметричную форму. Для характеристики их качества и назначения допусков используют понятия общей, зональной и местной погрешностей.

Общей погрешностью поверхности называется такое отклонение поверхности от ее теоретического вида, при котором вид поверхности остается неизменным. Например, при изготовлении сферической поверхности с заданным радиусом может быть получена строго сферическая поверхность, но с другим радиусом кривизны. При изготовлении параболического зеркала с заданным фокусным расстоянием может быть получено высококачественное параболическое зеркало, но с измененным фокусным расстоянием, что практически не мешает использовать его по прямому назначению. При изготовлении плоской поверхности часто получают сферическую поверхность с очень большим радиусом кривизны. В большинстве практических случаев важно сохранить неизменным именно вид поверхности, так как хотя это влечет за собой, как правило, изменение внешних характеристик оптической системы (например, фокусного расстояния фотографического объектива), но незначительно влияет на ухудшение качества изображения, что справедливо только в случае сравнительно малых по значению общих погрешностей поверхностей.

Зональной погрешностью поверхности называют такое отклонение реальной поверхности от ее теоретического вида, при котором не нарушается ее осевая симметрия. Наиболее типичным примером зональной ошибки является так называемый «завал края», когда форма реальной поверхности резко отклоняется от теоретической на внешнем крае поверхности оптической детали (линзы, зеркала, пластинки и др.). Зональные ошибки, как правило, вызывают значительное ухудшение качества оптического изображения; они возникают при изготовлении сферических, плоских и асферических поверхностей и выявляются в результате контроля.

Местной (локальной) погрешностью называется отклонение отдельного участка поверхности от ее теоретического вида. Если этот участок поверхности мал (что чаще всего и бывает на практике), то местная погрешность не вызывает существенного снижения качества изображения. Например, на рабочей поверхности астрономических зеркал часто возникают местные погрешности, локализованные в малой области (отсюда второе их название — локальные), обусловленные многими технологическими факторами. Иногда эти участки закрывают непрозрачными экранами, при этом качество изображения практически остается неизменным, так как из общего волнового фронта выключаются участки, площадь которых ничтожно мала по сравнению с общей площадью рабочей поверхности зеркала.

Наиболее вредна *астигматическая погрешность* поверхности, под которой понимают отклонение всей формы поверхности от ее теоретического вида, причем значение этих отклонений различно

в разных направлениях от вершины поверхности к ее краям. Поверхность теряет осесимметричную форму, а кривизна ее в двух взаимно перпендикулярных направлениях становится различной, что приводит к существенному снижению качества изображения. Астигматическая погрешность поверхности, по существу, полностью изменяет ее теоретический вид: вместо осесимметричной поверхности получают, как правило, поверхность с двумя плоскостями симметрии.

2. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для контроля формы плоских поверхностей в оптической промышленности широко применяют интерференционный метод, при котором часто используют пробные стекла и интерферометры типа Физо. Реже применяют теневой метод, а также метод наблюдения дифракционного изображения точки (схема Коммона), так как при этих методах затруднена количественная оценка погрешностей поверхности.

ПРОБНОЕ СТЕКЛО

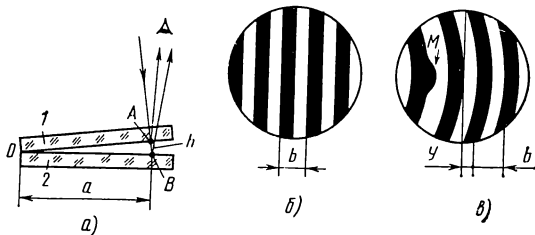
Наиболее широко пробное стекло используют для контроля плоских поверхностей сравнительно небольших диаметров (до 130 мм).

Сущность метода заключается в использовании интерференционных явлений, возникающих в тонком воздушном слое между эталонной и контролируемой поверхностями.

Пусть пластина 1 (рис. 62, а) имеет идеально плоскую нижнюю поверхность, образующую тонкий клинообразный слой с контролируемой поверхностью пластины 2. Луч, падающий на пластину 1 приблизительно по нормали к нижней поверхности, частично отражается в точке А. Интенсивность отраженного луча составляет 4—5 % первоначальной интенсивности при контроле поверхностей, изготовленных из оптического стекла. Второе отражение луча, вышедшего из пластины 1, происходит в точке В, расположенной на контролируемой поверхности. Таким образом, возникают два когерентных луча, имеющих приблизительно одинаковую интенсивность. Поверхность ОА служит разделительным

Рис. 62. Схема образования интерференционной картины при контроле плоских поверхностей методом пробных стекол:

а — схема образования когерентных лучей; б — вид интерференционных полос; в — количественная оценка погрешности поверхности



элементом в простейшем интерферометре. Очевидно, что разность хода между интерферирующими лучами равна удвоенному воздушному зазору в наблюдаемой точке, т. е. $2h$. Угол α воздушного клина равен отношению h/a , а ширина интерференционной полосы в данном случае (рис. 62, б)

$$b = \frac{a\lambda}{2h}, \quad (61)$$

где λ — длина волны света, используемого для наблюдения интерференционной картины.

Если $h = \lambda/2$, то ширина одной интерференционной полосы займет все поле интерференции, т. е. $a = b$. В клинообразном слое, образованном плоскими поверхностями, наблюдаются интерференционные полосы равной толщины, параллельные ребру клина. Качество контролируемой поверхности оценивается по искривлению интерференционных полос. Форма интерференционной полосы по значению и знаку воспроизводит профиль воздушного слоя, заключенного между поверхностями в сечении, параллельном направлению полос.

Для количественной оценки качества поверхности (рис. 62, в) используют формулу, позволяющую вычислить отклонения контролируемой поверхности от эталонной:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} \left(-\frac{y}{b} \right), \quad (62)$$

где λ — длина волны света (при использовании белого света $\lambda = 0,55$ мкм); y — стрелка прогиба интерференционной полосы; b — ширина интерференционной полосы.

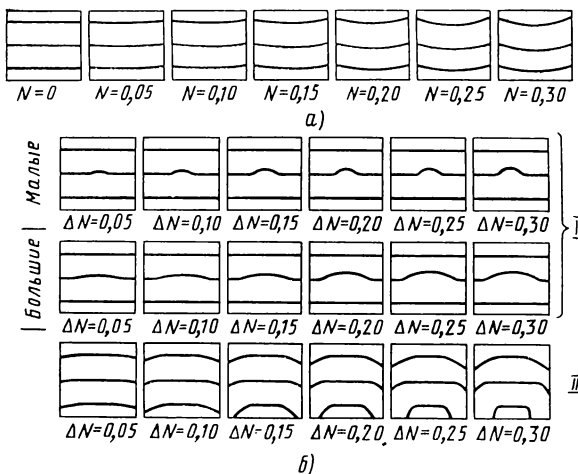
Обычно общие погрешности плоских и сферических поверхностей оценивают числом интерференционных полос N и ΔN , т. е. отношением y/b . Например, на рис. 62, в общая погрешность поверхности $N \approx 0,5$; местную погрешность M можно оценить значением $\Delta N \approx 0,2$.

Для определения знака погрешности поверхности следует нажать на край пробного стекла. Если интерференционные полосы стягиваются к точке нажатия, то на контролируемой поверхности имеется бугор, в противном случае — яма. В оптических цехах иногда используют специальные плакаты (рис. 63), на которых интерференционные полосы изображены тонкими линиями и приведены результаты оценки качества поверхностей, выраженные в N и ΔN .

Главное преимущество контроля поверхностей с помощью пробного стекла заключается в его простоте, а также возможности использования непосредственно на рабочем месте. Однако метод имеет и существенные недостатки: необходимость тщательной очистки поверхности контролируемой детали и уравнивания температуры детали и пробного стекла, что значительно снижает

Рис. 63. Типовые погрешности поверхностей:

a — общие, *б* — местные;
I — в центре поверхности;
II — по краям поверхности



производительность контроля; возможность повреждения контролируемой поверхности при наложении на нее пробного стекла; точность метода во многих случаях оказывается недостаточной.

ИНТЕРФЕРОМЕТР ФИЗО

В интерферометрах Физо, в которых для оценки качества поверхностей и деталей используют как кольца равного наклона, так и полосы равной толщины и наклона, устранен главный недостаток пробных стекол — контакт эталонной поверхности с контролируемой. Полосы равной толщины чаще применяют на практике ввиду их большой наглядности и простоты.

Оптическая система интерферометра (рис. 64) содержит монокроматический источник света *1* (ртутная или натриевая лампа), конденсор *2* и диафрагму *3*, установленную в заднем фокусе F' коллиматорного объектива *5*. За объективом расположена клиновидная пластина *6*, нижняя поверхность *Э* которой выполнена эталонной. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива *5*, поступает на эталонную поверхность пластины *6* и, частично отражаясь от нее, проходит к контролируемой поверхности *К* детали *7*. После отражения от контролируемой поверхности лучи света идут в обратном направлении, накладываются на лучи, отраженные от эталонной поверхности, и интерферируют с ними. Полупрозрачная пластина *4* служит для направления лучей в зрачок глаза *8* наблюдателя, с центром которого совмещена точка A' , являющаяся изображением центра *A* диафрагмы *3*. В этом положении глаза наблюдатель рассматривает интерференционную картину, локализованную в воздушном зворе между поверхностями *Э* и *К*. Для получения интерференционной картины контролируемая поверхность *К* должна располагаться параллельно эталонной поверхности *Э*, что проверяется по совмещению авто-

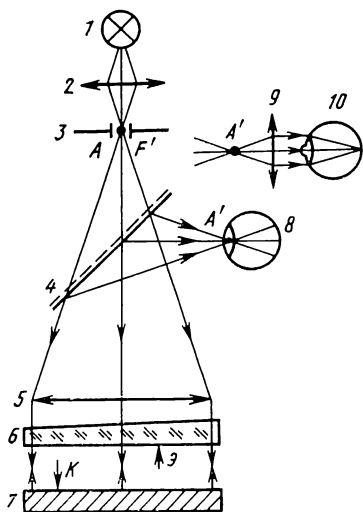


Рис. 64. Принципиальная схема интерферометра Физо для контроля плоских поверхностей

коллимационных изображений диафрагмы 3, наблюдаемых глазом 10 с помощью сменного окуляра 9.

Форма интерференционных полос в увеличенном масштабе воспроизводит топографию контролируемой поверхности. Количественная оценка погрешностей аналогична оценке погрешностей методом пробных стекол. Точность контроля на интерферометрах типа Физо зависит от многих факторов. К основным относятся отклонение эталонной поверхности от идеальной плоскости, сферическая аберрация коллиматорного объектива, погрешность оценки значения искривления интерференционных полос, взаимный сдвиг интерферирующих волновых фронтов, вызванный наклонным падением пучков на воздушную пло-

скопараллельную пластину, образованную поверхностями Э и К. Достижимая на практике точность составляет приблизительно 0,05 ... 0,1 ширины полосы.

Для повышения точности измерений используют многолучевую интерференцию, для чего на эталонную и контролируемую поверхности наносят зеркальные покрытия. Качество контролируемой поверхности, как и в двухлучевом интерферометре, оценивается по искривлению полос. Благодаря узким максимумам интенсивности света и большим расстояниям между полосами их искривление может быть измерено с точностью до 0,01 ширины полосы, а при благоприятных условиях точность может быть повышена до 0,002 интервала между полосами. Наша промышленность выпускает следующие интерферометры типа Физо: ИТ-40, ИТ-70, ИТ-87, ПК-452, отличающиеся рабочими диаметрами эталонных плоскостей (70 ... 280 мм).

Для контроля формы плоских поверхностей больших размеров применяют другие методы и приборы. Основная трудность контроля крупногабаритных поверхностей заключается в необходимости использования эталонной поверхности, размеры которой соизмеримы с контролируемой, а изготовление эталонных поверхностей больших размеров — сложная техническая задача. Поэтому большой интерес представляют схемы контроля, основанные на использовании свободной поверхности жидкости в качестве эталона плоскости. Заметим, что радиус свободной поверхности жидкости равен радиусу земного шара (~6400 км); например, стрелка прогиба поверхности диаметром 1,5 м равна 0,044 мкм

$\approx \lambda/14$ и ее уже следует учитывать при точных измерениях. При этом используют воду, ртуть и масла. При использовании неоднородного по составу масла и наличии электростатического заряда возникают местные деформации поверхности, которые исчезают после перемешивания масла и снятия с его поверхности заряда. Кроме того, вибрации сосуда с жидкостью вызывают рябь на ее поверхности, поэтому для выполнения точного контроля требуется надежная виброзащита прибора. Видимо, этот недостаток послужил основной причиной ограниченного практического использования принципиально ценной научной идеи.

Плоские поверхности больших размеров можно контролировать с помощью вспомогательного зеркала, вогнутая сферическая поверхность которого служит эталоном (схема Коммона). Качество сферической поверхности заранее проверяется теневым или интерференционным методом.

Рассмотрим схему Коммона (рис. 65). Лучи света, выходящие из точки C (центр кривизны сферического зеркала 2), образуют сферический волновой фронт, форма которого должна остаться неизменной при однократном отражении от зеркала 2 и двукратном — от плоскости 3. Точка C' является изображением точки C . Если сферическая поверхность имеет идеальную форму, то деформация волнового фронта обусловлена только погрешностями плоской поверхности. Анализ формы отраженного волнового фронта выполняют с помощью интерферометра, теневого прибора или микроскопа 1 (для наблюдения дифракционного изображения точки). Апертурный угол σ вычисляют по формуле $\sin \sigma = D/(2r)$, где D — диаметр зеркала; r — радиус сферической поверхности зеркала.

Угол ε наклона зеркала к оси пучка выбирают в зависимости от размеров элементов 2 и 3 на стадии габаритного расчета схемы. Если поверхность плоского зеркала выполнена с погрешностью Δ , то, как следует из рис. 61 и формулы (58), волновой фронт будет деформирован на значение $h \approx 4\Delta \cos \varepsilon$ (лучи света дважды отражаются от плоской поверхности).

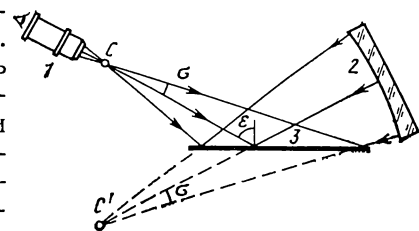


Рис. 65. Схема Коммона для контроля формы плоских поверхностей больших размеров

3. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОБНОЕ СТЕКЛО

Сущность контроля заключается в том, что на контролируемую сферическую поверхность накладывают эталонную поверхность пробного стекла аналогично методу пробных стекол,

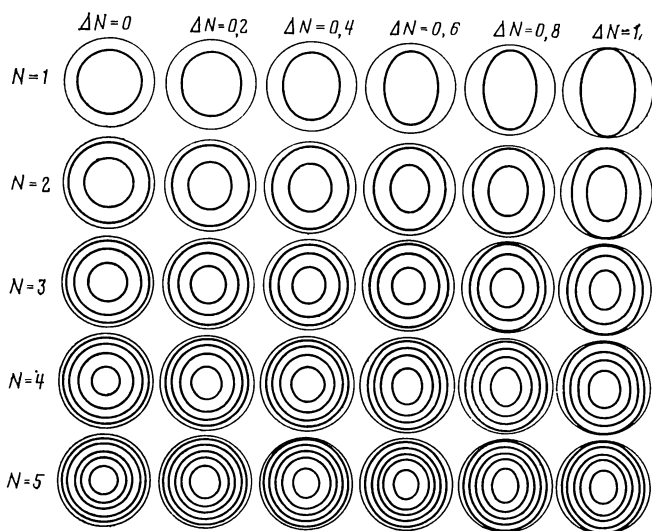


Рис. 66. Астигматические погрешности сферических поверхностей, контролируемых пробными стеклами

применяемому для контроля плоских поверхностей. Качество поверхности оценивают по виду интерференционной картины, локализованной в воздушном зазоре между контролируемой и эталонной поверхностями. Интерференционную картину можно получить в виде замкнутых колец или полос.

Для оценки астигматической погрешности и погрешности радиуса поверхности используют интерференционные кольца, для выявления и оценки местных погрешностей, а также дефектов краевых зон целесообразно получить интерференционную картину в виде полос. Для этого слегка нажимают на край пробного стекла. При визуальной оценке погрешности радиуса измеряется с точностью приблизительно 0,5 кольца, другие дефекты — с точностью 0,1 ширины полосы. Цена одного интерференционного кольца или полосы, как и в случае контроля плоских поверхностей, равна $\lambda/2$ (λ — длина волны света, используемого для контроля). При контроле в белом свете обычно принимают $\lambda = 0,55$ мкм.

Если на контролируемой сферической поверхности диаметром D и радиусом r при наложении на нее пробного стекла наблюдается N интерференционных колец круглой формы, то значение отклонения радиуса поверхности от эталонной поверхности пробного стекла

$$\Delta r = 4\lambda N (r/D)^2.$$

Кольца при наличии астигматизма поверхности принимают эллиптическую форму (рис. 66). В этом случае астигматизм поверхности оценивают либо по разности чисел интерференционных колец, либо по разности Δr в двух диаметральных сечениях,

В оптических цехах для оценки значений местных погрешностей используют специальные плакаты (рис. 67), которые помогают быстро оценить значение местной погрешности в типовых случаях. Вид интерференционной картины при наличии местной погрешности $\Delta N = 0,5$ для случаев, когда общая погрешность $N = \pm 5$, показан на рис. 67.

На практике применяют пробные стекла, диаметр которых, как правило, не превышает 180—200 мм. Объясняется это тем, что с увеличением диаметра пробного стекла существенно возрастает трудоемкость его изготовления, а следовательно, стоимость. Кроме того, уменьшается производительность и точность контроля, так как возникают температурные деформации стекла, для уменьшения которых требуется длительный отстой. Большая масса пробного стекла увеличивает опасность повреждения контролируемой поверхности.

Для контроля поверхностей, размеры которых значительно превышают размеры пробного стекла, используют многократное на-

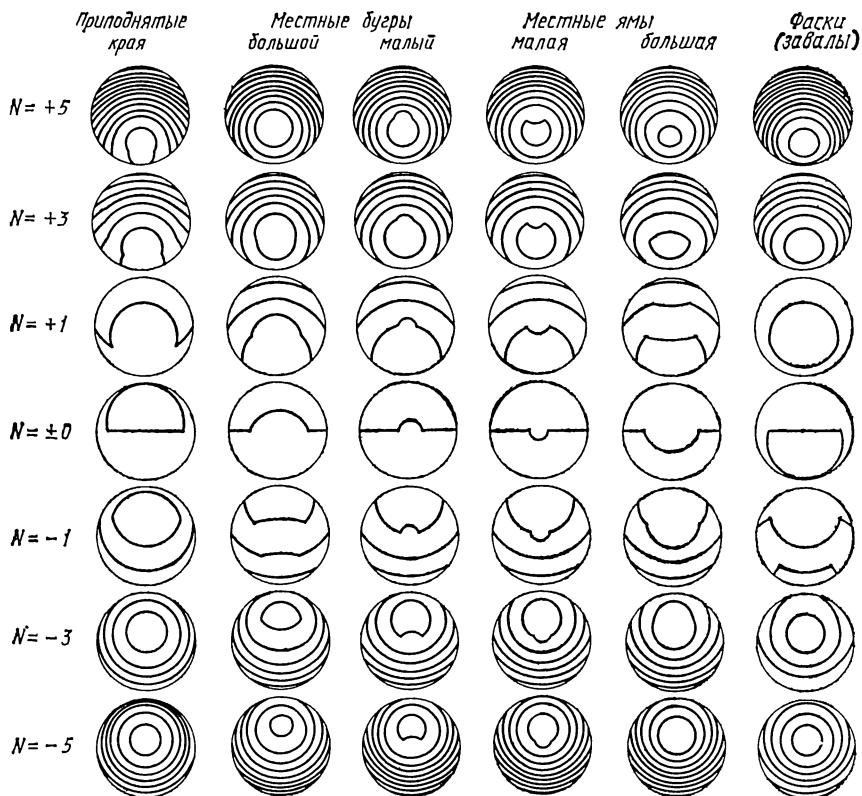


Рис. 67. Местные ($\Delta N = 0,5$) и общие ($N = \pm 5$) погрешности сферических поверхностей, контролируемых пробными стеклами

ложение пробного стекла на проверяемую деталь (отсюда видоизмененное название метода — «метод переналожения»). Диаметральное сечение проверяемой поверхности делят на отрезки, приблизительно равные $1/3$ диаметра пробного стекла. Концы отрезков нумеруют и отмечают точками (реперами). Затем накладывают пробное стекло так, чтобы в первом положении («стоянке») оно покрывало 1-ю, 2-ю и 3-ю точки, на второй стоянке — 2-ю, 3-ю и 4-ю точки и т. д. Если диаметр пробного стекла равен 180 мм, а диаметр проверяемой поверхности — 600 мм, то необходимо 10-кратное наложение пробного стекла. На каждой стоянке интерференционные полосы ориентируют приблизительно перпендикулярно к выбранному сечению или параллельно ему. В первом случае качество поверхности оценивают по разности ширины полос, во втором — по форме полосы, ближайшей к выбранному сечению (линии репер), при этом необходимо точно оценить значение и знак погрешности поверхности в каждой реперной точке. Это позволяет сравнительно просто определить профиль проверяемой поверхности, так как известен профиль ее отдельных участков. Суммарная погрешность ΔN оценки профиля всей поверхности

$$\Delta N = \Delta N_0 \sqrt{K},$$

где ΔN_0 — погрешность оценки профиля на одной стоянке; K — число стоянок.

Экспериментально установлено, что при использовании фотографического метода регистрации интерференционной картины, точном измерении ее параметров, учете собственных погрешностей пробного стекла погрешность ΔN_0 может быть снижена до $0,02\lambda$. Однако оценка астигматизма крупных поверхностей методом переналожения пробного стекла оказывается недостаточно точной и во многих случаях не удовлетворяет требованиям практики.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИАМЕТРОМ ДО 250 ММ

К этой группе относятся интерферометры, в которых эталонный волновой фронт образуется при отражении одного из двух когерентных пучков от эталонной вогнутой или выпуклой сферической поверхности. Диаметр эталонной сферической поверхности, как правило, не превышает 250 мм.

Принципиальная схема интерферометров рассматриваемого типа построена по схеме интерферометра Физо, в котором рабочая и эталонная ветви совмещены. Интерферометры с совмещенными ветвями менее чувствительны к вибрациям, неоднородностям воздушной среды, более компактны, имеют более простую конструкцию по сравнению с интерферометрами, имеющими две отдельные ветви. Последние, как правило, построены по схеме интерферометра Тваймана—Грина.

Рис. 68. Принципиальная схема интерферометра типа КЮ:

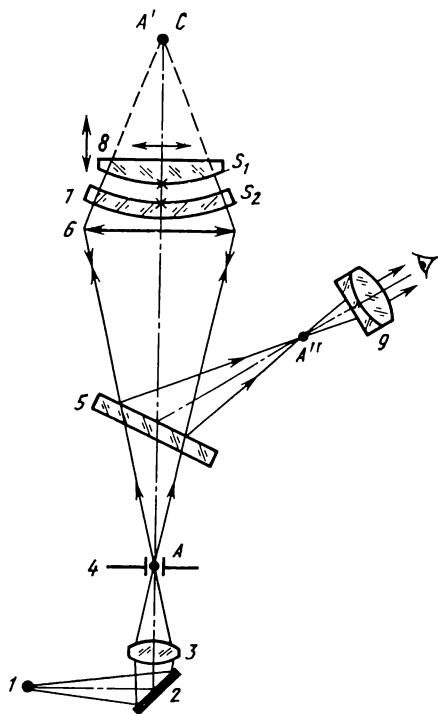
1 — источник света; 2 — зеркало; 3 — конденсорная линза; 4 — диафрагма; 5 — полупрозрачное зеркало; 6 — объектив; 7 — concentric мениск; 8 — контролируемая деталь; 9 — сменный окуляр; A' — изображение точки A , построенное объективом 6 и мениском 7; C — центр кривизны контролируемой сферической поверхности; A'' — изображение точки A' , построенное в обратном ходе лучей

Представителями интерферометров этой группы являются интерферометры типа КЮ (рис. 68), разработанные в СССР Ю. В. Коломийцовыми и И. И. Духопелом, а также голографический интерферометр [6].

Наиболее важной особенностью интерферометра является наличие значительного воздушного промежутка между контролируемой S_1 и эталонной S_2 поверхностями. Размер воздушного промежутка может достигать 2 ... 3 мм, при этом контраст интерференционной картины остается удовлетворительным. Эта особенность интерферометра дает три важных преимущества: значительное расширение диапазона радиусов кривизны контролируемых сферических поверхностей; возможность выявления малых местных погрешностей при значительном отклонении радиуса кривизны сферической поверхности от номинального значения; возможность контроля асферических поверхностей, мало отличающихся от сферы.

Интерференционная картина возникает в воздушном зазоре между поверхностями S_1 и S_2 . Когерентность интерферирующих лучей обеспечивается расщеплением первичных лучей на эталонной поверхности S_2 . Каждый луч, выходящий из объектива 6, достигнув поверхности S_2 , расщепляется на два луча: один из них отражается от поверхности S_2 и повторяет свой путь в обратном направлении, другой проходит через поверхность S_2 , отражается от контролируемой поверхности S_1 и также повторяет свой путь в обратном направлении. Очевидно, что разность хода между интерферирующими лучами равна удвоенному значению воздушного зазора между поверхностями S_1 и S_2 , а когерентными источниками света можно считать вершины пучков лучей, отраженных от этих поверхностей.

Контролируемая деталь 8 может перемещаться в продольном и поперечном направлениях, поэтому интерференционную картину



получают как в виде полос, так и в виде колец. Очевидно, что любое искажение сферической поверхности S_1 вызовет деформацию отраженного от нее волнового фронта, что приведет к соответствующему искривлению интерференционных полос или колец. Определяя значения этих искажений, находят место и значения погрешностей контролируемой поверхности.

ИНТЕРФЕРОМЕТР ИТ-172

Интерферометр ИТ-172 (рис. 69) имеет схему интерферометра Тваймана—Грина. Основное назначение интерферометра — контроль формы вогнутых сферических поверхностей большого диаметра. Источником света в интерферометре служит гелий-неоновый лазер 1 (длина волны излучения $\lambda = 632,8$ нм). Лучи света, выходящие из лазера 1, направляются плоским зеркалом 2 (или системой из двух зеркал) на микрообъектив 3, а затем на светоделительный кубик 4, гипотенузная грань которого служит полупрозрачным зеркалом. Задний фокус F' объектива 3, центр кривизны C_3 эталонной поверхности Э зеркала 5 и центр кривизны C_K контролируемой поверхности К детали 6 оптически сопряжены, поэтому лучи, выходящие из кубика 4, падают нормально на поверхности Э и К. Отраженные лучи интерферируют между собой и образуют интерференционную картину, для наблюдения которой зрачок глаза располагается в общей вершине лучей, отраженных от поверхностей Э и К. В остальном работа интерферометра не отличается от работы интерферометров типа Тваймана—Грина.

Основное преимущество интерферометра ИТ-172 заключается в возможности контроля сферических поверхностей больших диаметров при использовании только одной эталонной поверхности небольшого диаметра (диаметр зеркала 5 равен 36 мм). Однако это преимущество обусловлено не принципиальными свойствами оптической системы, а высокой монохроматичностью лазерного излучения, благодаря чему интерференционная картина сохраняет высокий контраст при большой разности хода между интерферирующими лучами.

Важнейшим элементом интерферометра ИТ-172 является светоделительный кубик, размещенный в гомоцентрическом пучке лучей. Требования к точности изготовления и установки кубика при действующей апертуре более 0,2 трудновыполнимы. Кроме того, отражения от граней кубика создают рассеянный свет, который

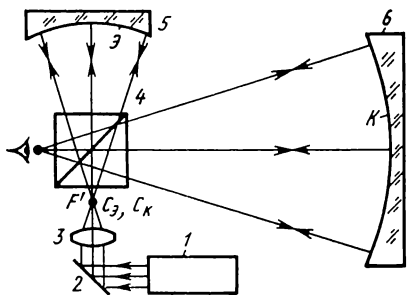


Рис. 69. Принципиальная схема интерферометра ИТ-172

снижает контраст интерференционной картины; контроль формы просветленных поверхностей затруднен ввиду световых потерь на светоделительной грани кубика; сферическую aberrацию, вносимую кубиком, необходимо компенсировать введением специально рассчитанного объектива.

Указанные недостатки интерферометра ИТ-172 препятствуют использованию его для контроля вогнутых поверхностей с большой числовой апертурой (под числовой апертурой сферической поверхности понимают значение $\sin \sigma' = D/(2r)$, где D — диаметр поверхности, r — радиус кривизны).

СВЕТОСИЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Для контроля формы высокоапертурных поверхностей с просветляющим покрытием или без него разработан светосильный лазерный интерферометр, главным элементом которого является апланатическая линза. Наиболее важное свойство ее заключается в том, что она преобразует числовую апертуру падающего пучка, сохраняя его гомоцентричность. Апланатическая линза мало чувствительна к децентрировкам, что объясняется полным отсутствием комы при малых смещениях предметной точки относительно оси.

В интерферометре (рис. 70, а) лучи света, выходящие из лазера 1, сфокусированы объективом 2 в точку А, расположенную внутри малого отверстия (диаметр 0,3 ... 0,4 мм) плоского зеркала 3, в роли которого удобно использовать покровное стекло толщиной 0,17 мм, применяемое в микроскопии. Зеркальное покрытие нанесено на той поверхности пластинки 3, которая обращена к линзе 4. Аналогичное оптическое действие оказывают призма 8 и диафрагма 9 (рис. 70, б). Указанное расположение элементов 2, 3, 8 и 9 (см. рис. 70, а, б) не позволяет проникнуть в интерферометр лучам света, образующим паразитные блики.

Вогнутая апланатическая поверхность линзы 4 строит изображение точки А в точке А' (рис. 70, а), совмещенной с центром эталонной выпуклой поверхности линзы 4, при этом апертурный угол σ увеличивается в n раз (n — показатель преломления линзы). Апертурные углы σ и σ' связаны между собой соотношением $\sin \sigma' / \sin \sigma = n$.

Интерференционная картина возникает при взаимодействии волновых фронтов, отраженных от эталонной Э и контролируемой К поверхностей, расположенных concentрично. Отраженные лучи вновь возвращаются в точку А, если система строго центрирована, отражаются от зеркала 3 и поступают на элементы 5—7 (штриховые линии на рис. 70, а показывают ход лучей для строго центрированной системы при отсутствии отверстия в зеркале 3). Внеосевое расположение светящейся точки В (рис. 70, в) принципиально ничего не изменит в наших рассуждениях. Небольшие наклоны линзы 4 поставят точку А вне оси, при этом гомоцентричность от-

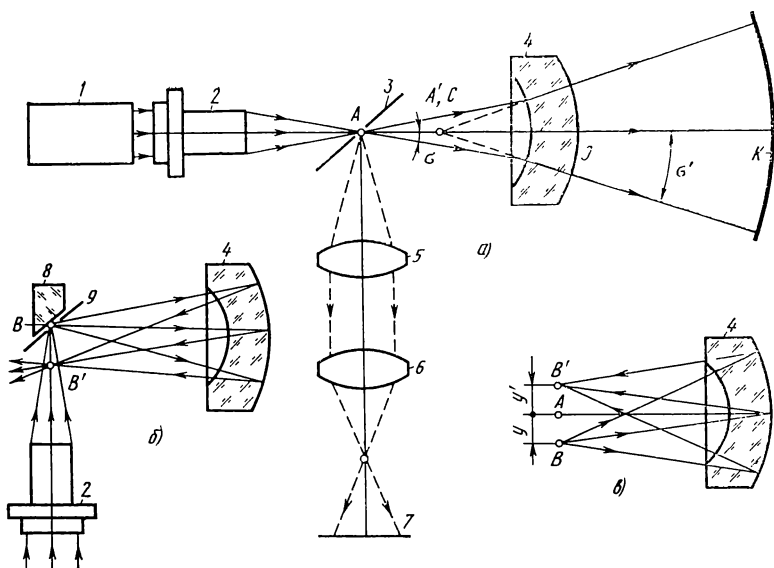


Рис. 70. Оптическая схема светосильного интерферометра

раженного пучка практически не нарушится. Очевидно, что вместо отрицательной линзы можно использовать положительную апланатическую линзу с нормальным падением лучей на вогнутую поверхность, при этом апертура преломленного пучка будет уменьшена в n раз.

В светосильном интерферометре используется тот же физический принцип образования интерференционной картины, что и в интерферометре Физо. Следовательно, светосильный интерферометр и интерферометр ИТ-172 имеют различные принципиальные схемы. Поэтому они имеют существенные различия в эксплуатационных возможностях. Светосильный интерферометр при использовании одного и того же микрообъектива позволяет контролировать поверхности с большей числовой апертурой, чем интерферометр ИТ-172; не содержит полупрозрачных поверхностей, что дает возможность применять его для контроля просветленных поверхностей; исключает появление паразитных бликов, что обеспечивает высокий контраст интерференционной картины. Кроме того, он значительно проще в изготовлении, так как только один его элемент (эталонная поверхность линзы 4) должен иметь высокое качество, а качество остальных элементов (готовых изделий) практически не влияет на результаты контроля.

Интерферометр (рис. 71) снабжен сменными микрообъективами ОСФ-11П с числовой апертурой $\sin \sigma = 0,4$ и ОМ-12 с числовой апертурой $\sin \sigma = 0,11$, а также тремя отрицательными и тремя апланатическими менисками с различными коэффициентами отражения эталонных поверхностей. В светосильном интерферометре

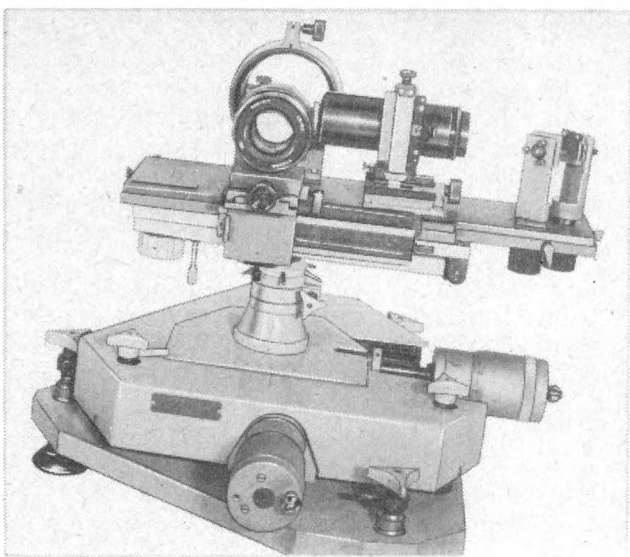


Рис. 71. Внешний вид светосильного интерферометра

использованы призмная система (рис. рис. 70, б) для внеосевого расположения светящейся точки и отдельные механические узлы интерферометра ИТ-172.

Опытная эксплуатация прибора показала, что он позволяет надежно контролировать высокоапертурные поверхности, удобен в эксплуатации, обеспечивает высокий контраст и чистое интерференционное поле (рис. 72).

В случае поперечного смещения точечного источника на 0,2 мм приборная астигматическая погрешность не превышает $0,02\lambda$ при числовой апертуре контролируемой поверхности 0,3 и $0,1\lambda$ при числовой апертуре 0,5. При использовании отрицательного мениска зональная приборная погрешность не превышает $0,06\lambda$ при числовой апертуре контролируемой поверхности до 0,6 и продольном смещении точечного источника в пределах $\pm 0,2$ мм.

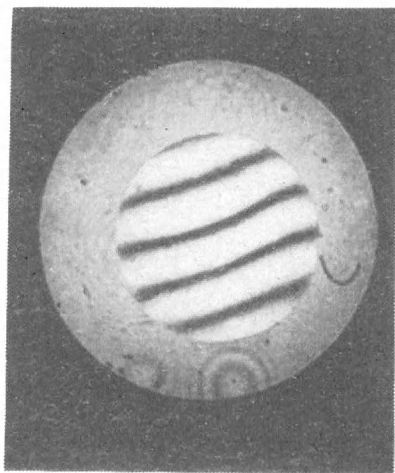


Рис. 72. Интерферограмма в виде полос сферической поверхности, проверенной на светосильном интерферометре

БАЗОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ИКАП-2

Принципиальной схемой многих интерферометров, предназначенных для контроля качества оптических поверхностей, деталей и систем, служит схема интерферометра Тваймана—Грина, который является известным видоизменением интерферометра Майкельсона. Использование лазеров в качестве источников монохроматического излучения позволило существенно расширить диапазоны применения интерферометров типа Тваймана—Грина и упростить их конструкции.

Интерферометр ИКАП-2 является прибором многоцелевого назначения. Сравнительно простые видоизменения рабочей ветви интерферометра ИКАП-2 дают возможность использовать его для контроля формы выпуклых и вогнутых сферических и асферических поверхностей, комплексного контроля качества крупногабаритных линз, объективов и телескопических систем. Оптическая схема интерферометра ИКАП-2 позволяет перестроить его схему на схему интерферометра Физо и тем самым еще больше расширить диапазон применения.

При разработке конструкции интерферометра ИКАП-2 был использован модульный принцип создания конструктивно сложных устройств. В основной модуль интерферометра входят оптические элементы, обведенные штриховой линией на рис. 73, рабочая ветвь интерферометра (элементы 10—12) настроена на контроль выпуклой сферической поверхности *A* линзы 11 по схеме интерферометра Физо. Рассмотрим принцип действия интерферометра для этого случая.

Лучи света, идущие из гелий-неонового лазера 1 с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм, фокусируются линзой 2 в отверстие диафрагмы 3, установленной в заднем фокусе объектива 4. Элементы 2 и 4

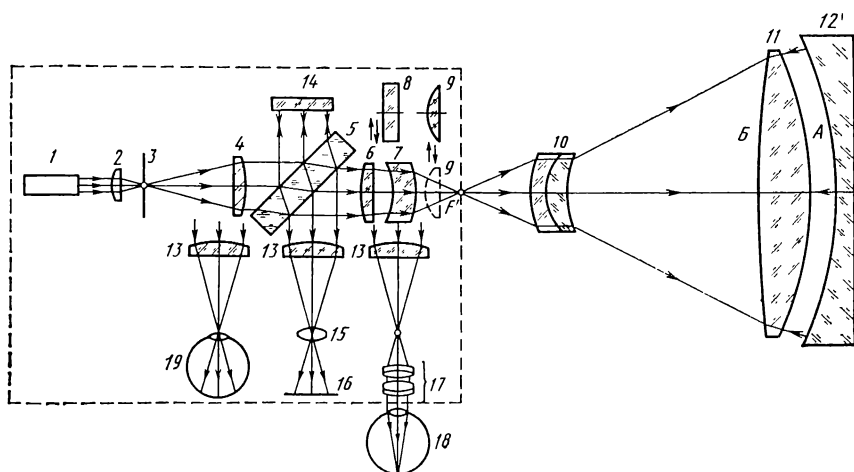


Рис. 73. Оптическая схема интерферометра ИКАП-2

образуют телескопическую систему Кеплера, которая служит для расширения пучка и уменьшения его расходимости. Диффрагма 3 с малым отверстием в центре служит для формирования сферического волнового фронта и устранения вредного фона. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива, поступает на плоскопараллельную пластину 5, установленную под углом 45° к оси, и разделяется на два пучка. Один из них идет в эталонную ветвь интерферометра, в которой установлено плоское зеркало 14; другой — в рабочую ветвь, в которой расположены объектив, состоящий из линз 6 и 7, компенсатор 10, контролируемая линза 11 и эталонное сферическое зеркало 12.

Объектив рабочей ветви (линзы 6 и 7) служит для формирования эталонного сферического волнового фронта, поэтому он должен быть скорректирован на сферическую абберацию и кому. Один из вариантов объектива, специально рассчитанный для данного интерферометра, имеет фокусное расстояние $f' = 40$ мм и относительное отверстие 1 : 2. Остаточная волновая абберация объектива не превышает значения $\lambda/20$ в одном ходе лучей.

Рассмотрим ход лучей в рабочей ветви интерферометра при контроле выпуклой сферической поверхности А линзы 11 с помощью компенсатора 10 и эталонного зеркала 12. Лучи света, выходящие из линз 6 и 7, формируют сферический волновой фронт, вершина которого расположена в заднем фокусе F' . Компенсатор 10 совместно с поверхностью Б линзы 11 преобразует сферический волновой фронт вновь в сферический, но с центром кривизны, совмещенным с центром кривизны контролируемой поверхности А. Поэтому лучи света падают нормально к поверхности А во всех ее точках.

В данном случае поверхность А служит разделительным элементом интерферометра; каждый луч, падающий на эту поверхность, расщепляется на два луча: один отражается от поверхности А и повторяет свой путь в обратном направлении, другой идет к сферической поверхности зеркала 12, отражается от нее и также идет в обратном направлении. Так как центры кривизны поверхности А и зеркала 12 совмещены, то в воздушном промежутке между ними не возникает разности хода, если поверхность А не имеет отклонений от сферической формы. Лучи света, отраженные от поверхности А и зеркала 12, интерферируют между собой.

Для визуального наблюдения и фотографирования интерференционной картины, а также для юстировки интерферометра служит регистрирующая ветвь интерферометра, состоящая из объектива 13, линзы 15, фотопленки 16, окуляра 17. Глаз 18 показан в положении, когда наблюдатель юстирует интерферометр; при визуальном наблюдении интерференционной картины зрачок глаза 19 совмещают с задним фокусом объектива 13, при этом зеркало 14 выключается из хода лучей.

Для проверки качества плоского зеркала 14 и разделительной пластины 5 предусмотрено эталонное плоское зеркало 8, которое

вводится в рабочую ветвь интерферометра вместо объектива 6, 7. В этом случае интерферометр работает по схеме интерферометра Майкельсона и позволяет с высокой точностью проверить качество наиболее важных элементов приборов. Для проверки качества объектива 6, 7 предусмотрено эталонное сферическое зеркало 9, которое устанавливается за объективом так, чтобы центр кривизны зеркала 9 совместился с задним фокусом F' объектива 6, 7. В этом случае интерферометр работает по схеме интерферометра Тваймана—Грина и позволяет с высокой точностью проверить качество объектива 6, 7, предназначенного для формирования сферического волнового фронта.

Важно заметить, что при контроле выпуклых сферических поверхностей с помощью эталонного сферического зеркала не предъявляют высоких требований к качеству объектива 6, 7 и компенсатора 10. Объясняется это тем, что разность хода между интерферирующими лучами обусловлена только воздушным промежутком между контролируемой поверхностью A и эталонным зеркалом 12, так как интерферирующие лучи после отражения от них проходят один и тот же путь. Так как в этом случае разделительным элементом интерферометра служит контролируемая поверхность A (рис. 73), эталонное плоское зеркало 14 не участвует в образовании интерференционной картины и выключается из хода лучей.

Недостаток рассмотренной схемы контроля выпуклой сферической поверхности A крупногабаритной линзы 11 заключается в необходимости изготовления эталонного зеркала 12, диаметр которого соизмерим с диаметром линзы 11. Однако значение этого недостатка несколько снижается тем, что однажды изготовленное эталонное зеркало можно использовать для контроля выпуклых сферических поверхностей различных радиусов. Другой недостаток заключается в необходимости расчета и изготовления компенсатора, пригодного только для данной линзы.

Расширение диапазона применения интерферометра достигается изменением его рабочей ветви. В том случае, когда компенсатор 1 (рис. 74, a) имеет простую конструкцию и малые остаточные aberrации, выпуклую поверхность линзы 2 можно контролировать без применения эталонного сферического зеркала. Однако в этом случае в результаты контроля входят погрешности первой поверхности линзы и погрешности, вызванные оптической неоднородностью стекла контролируемой линзы. Эти факторы должны быть учтены при обработке результатов контроля.

Часто возникает необходимость комплексного контроля линзы 2 (рис. 74, b) в параллельном пучке лучей с помощью компенсатора 1 и эталонного плоского зеркала 3. В этом случае определяют суммарную погрешность линзы, вызванную погрешностями обеих поверхностей и оптической неоднородностью стекла, причем обе поверхности линзы проверяют приблизительно в одинаковых условиях. Особенно целесообразно применить схему, приведенную на рис. 74, b , для контроля качества головных линз объективов,

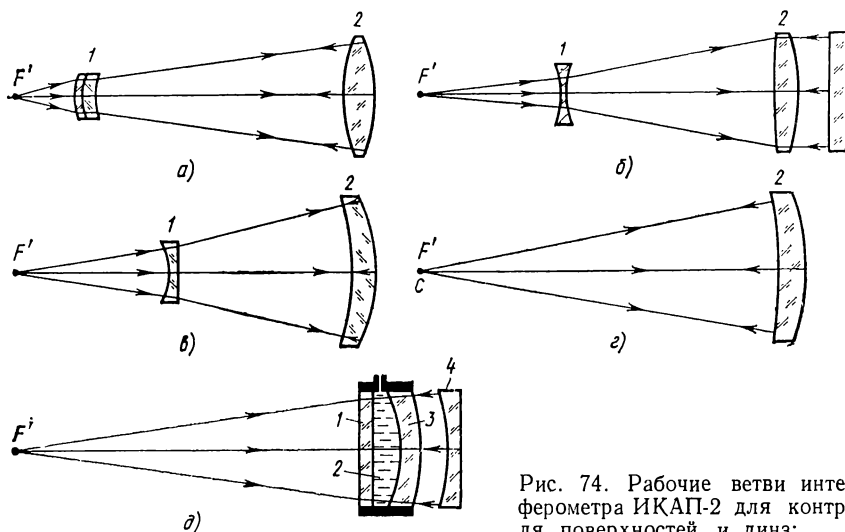


Рис. 74. Рабочие ветви интерферометра ИКАП-2 для контроля поверхностей и линз:

а — автоколлимация от второй выпуклой поверхности линзы 2; б — комплексный контроль качества линзы 2; в — автоколлимация от выпуклой поверхности менисковой линзы 2; г — автоколлимация от вогнутой поверхности линзы 2; д — автоколлимация от выпуклой поверхности линзы 3 и эталонного вогнутого зеркала 4

так как они установлены в объективах первыми по ходу лучей и воспринимают параллельный пучок лучей, идущий из удаленной точки объекта. Поэтому схема контроля линз с помощью эталонного плоского зеркала позволяет проверить линзу примерно в тех же условиях, в которых она используется в объективе по прямому назначению.

Наиболее удобны для контроля менисковые положительные линзы. Компенсатор 1 (рис. 74, в), как правило, представляет собой простую отрицательную линзу. Для контроля качества вогнутых поверхностей линз можно использовать объектив 6, 7 (см. рис. 73), совмещающий его задний фокус F' (рис. 74, г) с центром кривизны C контролируемой поверхности. Однако в этом случае объектив интерферометра, формирующий сферический волновой фронт, должен иметь высокое качество, так как его собственные погрешности переносятся на волновой фронт в удвоенном значении.

Для контроля качества выпуклых поверхностей отрицательных менисковых линз 3 (рис. 74, д) может быть применено устройство, состоящее из плоскопараллельной пластины 1, иммерсионной жидкости 2 и эталонного сферического зеркала 4, центр кривизны которого совмещен с центром кривизны выпуклой поверхности линзы 3.

Для контроля высокоапертурных вогнутых сферических поверхностей 2 (рис. 75) в рабочей ветви интерферометра устанавливают отрицательный апланатический мениск 1. Задний фокус F'

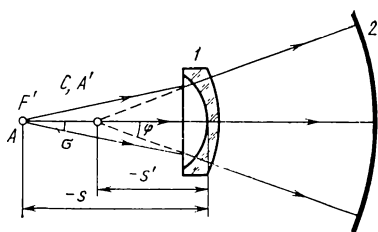


Рис. 75. Схема рабочей ветви интерферометра ИКАП-2 для контроля формы высокоапертурной вогнутой сферической поверхности с помощью отрицательного апланатического мениска

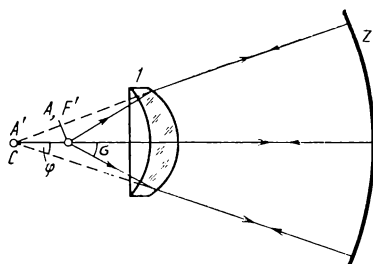


Рис. 76. Схема рабочей ветви интерферометра ИКАП-2 для контроля формы малоапертурной вогнутой сферической поверхности с помощью положительного апланатического мениска

объектива интерферометра является предметной точкой A , изображение которой (точка A') совмещено с центром кривизны C поверхности 2 . Между отрезками s, s' (см. рис. 75) и радиусом r вогнутой поверхности линзы 1 существует связь:

$$s = ns' = (n + 1) r,$$

где n — показатель преломления линзы 1 .

Углы φ и σ связаны между собой соотношением $\sin \varphi = n \sin \sigma'$, а $\sin \varphi = D/(2R)$, где D — диаметр сферической поверхности 2 , R — ее радиус кривизны.

Для контроля малоапертурных вогнутых сферических поверхностей 2 (рис. 76) используют положительный апланатический мениск 1 . Задний фокус F' объектива интерферометра является предметной точкой A , расположенной в центре кривизны вогнутой поверхности мениска 1 . Точка A' , являющаяся мнимым изображением точки A , совмещена с центром кривизны C поверхности 2 . Между углами σ и φ существует связь:

$$\sin \varphi = D/2R = (\sin \sigma)/n.$$

Таким образом, интерферометр ИКАП-2 может быть использован для контроля формы вогнутых и выпуклых сферических поверхностей, асферических поверхностей, комплексного контроля качества крупногабаритных и малогабаритных линз, для контроля формы астрономических зеркал крупных телескопов.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С РАССЕИВАЮЩЕЙ ПЛАСТИНОЙ

В 1933 г. академик В. П. Линник предложил простую схему интерферометра для контроля качества оптических систем, хорошо скорректированных на сферическую абберацию. Идея интерферометра основана на использовании тонкой полупрозрачной пластинки с малым отверстием в центре, с помощью которой соз-

дается эталонный сферический волновой фронт. Поясним это подробнее.

Пусть на объектив *1* (рис. 77) падает плоский волновой фронт и преобразуется в волновой фронт *P*, близкий к сферическому. Вблизи фокальной плоскости объектива *1* установлена тонкая полупрозрачная пластина *2*, которая практически не вносит aberrаций в пучок лучей, выходящий из объектива. Предположим, что в центре пластины *2*, совмещенном с параксиальным фокусом *F'*₀, размещено малое отверстие, которое является центром дифрагированного волнового фронта *P*₀. Волновой фронт проходит через плоскопараллельную пластину *2* без изменения формы, но с уменьшенной амплитудой, и преобразуется в волновой фронт *P'*. Сферический волновой фронт *P*₀ и исследуемый *P'* интерферируют между собой. Для наблюдения интерференционной картины зрачок глаза необходимо расположить за пластиной *2* и близко к ней.

Для наблюдения контрастной интерференционной картины по всему зрачку необходимо выполнить условие

$$d < \frac{1,22\lambda}{\sin \sigma'},$$

где *d* — диаметр отверстия в пластине *2*; λ — длина волны света; σ' — угол крайнего луча с осью.

Например, при относительно отверстию объектива 1 : 5, $\lambda = 0,6$ мкм получим $d < 7,3$ мкм. В полупрозрачных металлических пленках, нанесенных на стеклянную подложку, почти всегда имеются отверстия малого диаметра, которые можно использовать для создания эталонного сферического волнового фронта *P*₀, образованного дифрагированными лучами.

Очевидно, что интерферометр В. П. Линника значительно проще интерферометра Тваймана—Грина, малочувствителен к вибрациям и не требует вспомогательных оптических деталей большого диаметра при исследованиях объективов с большим входным зрачком. Интерферометр В. П. Линника имеет принципиальное значение, так как идея применения рассеивающих центров, создающих дифрагированные волновые фронты, использована при создании нового интерферометра, известного в научно-технической литературе под названием «интерферометр с рассеивающей пластиной» или интерферометр Бэрча.

Основное назначение прибора — контроль качества вогнутых сферических поверхностей, но он может быть применен и для контроля качества объективов с большим входным зрачком, если использовать дополнительное высококачественное плоское зеркало.

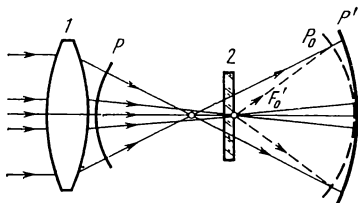


Рис. 77. Принципиальная схема интерферометра В. П. Линника

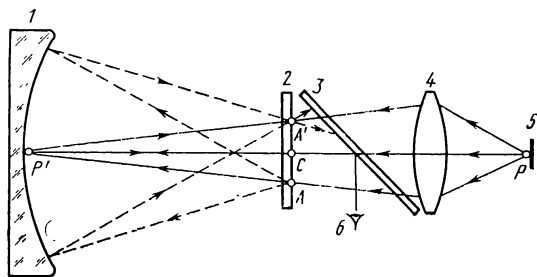


Рис. 78. Принципиальная схема интерферометра Бэрча для контроля формы вогнутых сферических поверхностей

Основные преимущества интерферометра с рассеивающей пластиной заключаются в том, что он мало чувствителен к вибрациям, не требует применения эталонной поверхности, имеет сравнительно простую конструкцию, в оптической схеме интерферометра нет оптических деталей, aberrации которых вносили бы погрешности в результаты контроля, требования к монохроматичности источника света сравнительно невысокие, в связи с этим можно использовать мощные источники света с немонохроматическим излучением.

Принцип действия интерферометра Бэрча [12], как и интерферометра В. П. Линника, основан на использовании волновых фронтов дифракционного происхождения, возникающих на рассеивающих центрах особым способом изготовленной пластины 2, установленной вблизи центра кривизны C контролируемого сферического зеркала 1 (рис. 78). Рассеивающая пластина 2 является основным элементом прибора, от ее качества зависит как контраст интерференционной картины, так и допустимая апертура контролируемых поверхностей. Основное требование к пластине — симметричное относительно оси расположение рассеивающих центров, расстояние между которыми приблизительно равно $3 \dots 4$ мкм.

Рассеивающую пластину можно изготовить путем двойного экспонирования фотопластинки, к которой прижата тонко шлифованная пластина. На светочувствительном слое фотопластинки фиксируется тонкая структура шлифованной поверхности матовой пластины, после чего фотопластинка поворачивается на угол 180° (погрешность угла поворота не превышает $1 \dots 2''$) и экспонируется вторично. Этим достигается симметричное расположение рассеивающих центров на пластине 2.

Рассмотрим ход лучей в интерферометре (см. рис. 78). Источник света 5 с помощью конденсорной линзы 4 проецируется на поверхность контролируемого зеркала 1 (точки P и P' являются оптически сопряженными), причем лучи света, идущие из точки P , проходят через полупрозрачную пластину 3 и рассеивающую пластину 2 так, как они обычно идут через плоскопараллельные пластины.

Луч AP' , падая на пластину 2 в точке A , дает начало сферическому волновому фронту с центром в точке A , образованному дифрагированными лучами. Очевидно, что этот волновой фронт явля-

ется строго сферическим, так как он образован дифрагированными лучами, а оптических деталей, искажающих его форму, нет. При отражении волнового фронта от сферического зеркала 1 образуется новый волновой фронт с центром в точке A' , симметрично расположенной относительно точки A . Отраженный волновой фронт не будет строго сферическим, так как он деформирован погрешностями изготовления контролируемого зеркала 1. Эти погрешности, как и в интерферометре Тваймана—Грина, переносятся на волновой фронт увеличенными в 2 раза. Волновой фронт с центром в точке A' , несущий информацию о качестве сферической поверхности зеркала 1, проходит через рассеивающую пластину 2 как через обычную плоскопараллельную пластину и интерферирует с эталонным сферическим волновым фронтом, имеющим центр в точке A' . Этот волновой фронт имеет то же происхождение, что и сферический волновой фронт с центром в точке A , т. е. начало ему дает луч $P'A'$, отраженный от зеркала 1. Очевидно, что эти рассуждения справедливы для любых пар симметрично расположенных рассеивающих центров, которых на пластине 2 имеется бесчисленное множество. Глаз наблюдателя 6, расположенный за пластиной 2, видит интерференционную картину, расшифровка которой ничем не отличается от расшифровки интерференционных картин, получаемых на интерферометрах типа Тваймана—Грина. Изменение ширины, направления и формы интерференционных полос достигается перемещением рассеивающей пластины 2 относительно центра кривизны C контролируемой сферической поверхности зеркала 1.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ СДВИГА

Особенность интерферометров сдвига заключается в том, что они не требуют применения эталонных оптических деталей, так как в них контролируемый волновой фронт накладывается на точно такой же, но сдвинутый волновой фронт. Сдвиг может быть боковым, поворотным, реверсивным или радиальным. Кроме того, интерферометры сдвига малочувствительны к вибрациям, так как интерферирующие лучи проходят практически один и тот же путь. Основным недостатком интерферометров сдвига является отсутствие наглядности и сравнительная сложность расшифровки интерференционной картины при количественной оценке погрешностей исследуемой системы.

Рассмотрим принцип работы интерферометра сдвига. Пусть на исследуемую оптическую систему (рис. 79), например объектив 1, падает плоский волновой фронт, который преобразуется в волновой фронт, в общем случае отличающийся от сферического. Кубик 2 с полупрозрачной гипотенузой гранью делит пучок лучей на два и направляет их к плоским зеркалам 3. Задний фокус F' объектива 1 совмещен с плоскостью зеркала 3. Лучи света, отраженные от зеркала 3, возвращаются на светодели-

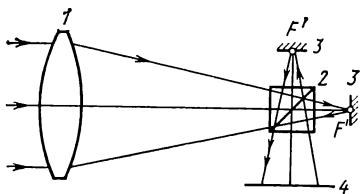


Рис. 79. Принципиальная схема интерферометра сдвига

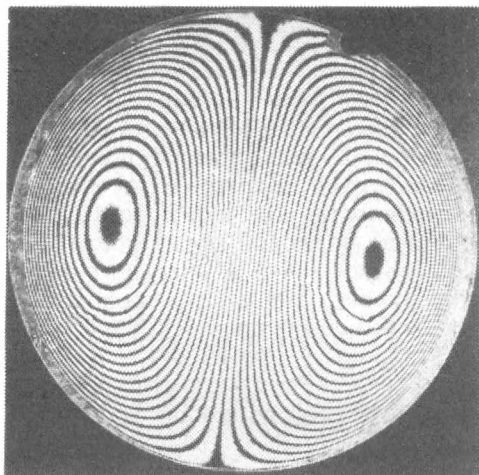


Рис. 80. Интерферограмма бокового сдвига параболических волновых фронтов

тельный кубик 2 и направляются к экрану 4, на котором возникает интерференционная картина.

Вид, форма и расположение интерференционных полос зависят как от деформации исследуемого волнового фронта, так и от настройки интерферометра. Если зеркала 3 расположены на равных расстояниях от выходных граней кубика 2, то поворотом одного из зеркал 3 вокруг точки F' можно получить интерференционную картину с боковым сдвигом волновых фронтов (рис. 80). Интерференционную картину с радиальным сдвигом волновых фронтов можно получить путем параллельного смещения одного из зеркал 3 (см. рис. 79), т. е. при неодинаковых расстояниях зеркал 3 от выходных граней кубика 2. Очевидно, что рассмотренная схема позволяет получить смешанный (радиально-боковой) сдвиг волновых фронтов путем соответствующих перемещений и наклонов зеркал 3.

Таким образом, интерференционная картина, получаемая на интерферометре сдвига, во всех случаях является результатом взаимодействия двух совершенно одинаковых, но смещенных один относительно другого волновых фронтов, полученных с помощью разделительного элемента. В качестве разделительных элементов используются поляризационные призмы, зеркала, клинья, дифракционные решетки и другие оптические элементы.

Рассмотрим образование интерференционной картины при взаимодействии двух волновых фронтов P_1 и P_2 (рис. 81) с центрами O_1 и O_2 , смещенными один относительно другого на расстояние b . Пусть a — недеформированный участок волнового фронта, c — деформированный, причем $b < a < c$. Волновой фронт P_2 смещен относительно волнового фронта P_1 в боковом направлении. Разобьем зону перекрытия волновых фронтов на отрезки, равные

значению сдвига (точки M_1, M_2, \dots, M_5), и проведем вертикальные линии до пересечения с профилями обоих волновых фронтов. Очевидно, что на участке M_1M_2 разность хода между сдвинутыми волновыми фронтами равна нулю или имеет постоянное значение, поэтому на этом участке интерференционная полоса имеет вид прямой линии. Деформированный участок M_2M_3 волнового фронта P_1 сравнивается с недеформированным участком M_2N волнового фронта P_2 . Очевидно, что на этом участке интерференционная полоса повторяет профиль волнового фронта P_1 , причем в точке M_3 отклонение волнового фронта P_1 от P_2 составляет некоторое значение h , которое перенесено в нижнюю часть рис. 81.

Аналогичные построения сделаны для остальных участков волновых фронтов. В точке B , где пересекаются профили волновых фронтов P_1 и P_2 , разность хода равна нулю. Таким образом, в зоне перекрытия деформированных участков волновых фронтов центральная интерференционная полоса имеет вид кривой AB_0C ; слева и справа от нее располагаются недеформированные участки волновых фронтов.

В практике чаще всего встречается обратная задача — построение формы волнового фронта по сдвиговой интерференционной картине. Решение этой задачи затрудняется, если деформация анализируемого волнового фронта имеет несимметричный и неплавный характер. Приемы работы на интерферометрах сдвига и расшифровки интерферограмм описаны в специальной литературе [12].

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

В последние годы для контроля формы оптических поверхностей все шире используют метод голографической интерферометрии. Сущность метода, выполняемого с помощью интерферометра, заключается в следующем (рис. 82).

Монохроматическое излучение лазера 1 с помощью линз 2, 4 и диафрагмы 3, образующих телескопическую систему Кеплера, поступает в виде параллельного пучка на полупрозрачную плоско-

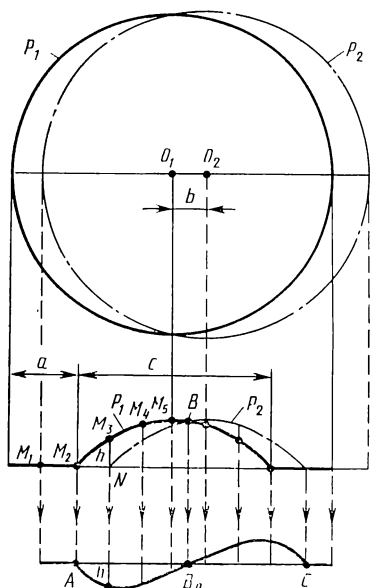


Рис. 81. Схема образования интерференционной картины при боковом сдвиге волновых фронтов

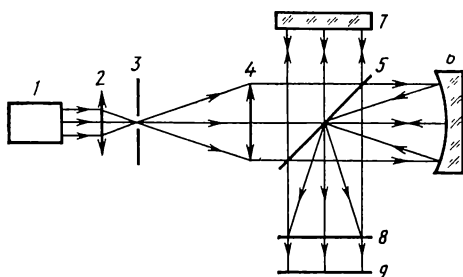


Рис. 82. Принципиальная схема голографического интерферометра

параллельную пластину — светоделитель 5, где делится на два пучка — опорный и рабочий. Последний идет к образцовой детали 6 (например, к параболическому зеркалу), отражается от нее, затем от светоделителя 5 и падает на фотопластинку 8. На нее же приходит опорный пучок от эталонного плоского зеркала 7. Очевидно, что опорный пучок лучей образует плоский волновой фронт, а рабочий пучок — сферический. На фотопластинке 8 образуется интерференционная картина (в данном случае в виде колец Ньютона), представляющая собой голографическую запись участвующих в интерференции волновых фронтов.

После химической обработки (проявления) фотопластинки получают голограмму и устанавливают ее на место фотопластинки, а образцовую деталь 6 заменяют проверяемой. Включив лазерное освещение, на экране 9 наблюдают интерференционную картину, по виду которой определяют отклонение проверяемой поверхности от образцовой.

Очевидно, что форма волнового фронта, идущего от образцовой поверхности, может быть определена теоретически точно. Поэтому интерференционная картина, возникающая в плоскости фотопластинки, может быть заранее рассчитана по теоретическим формулам, а голограмма изготовлена путем механической нарезки кольцевых полос на специальных делительных машинах. Такие голограммы называют синтезированными (искусственными) голограммами. Очевидно, что их изготовление во многих случаях значительно проще, чем изготовление образцовых поверхностей или деталей.

Возможность применения синтезированных голограмм вместо образцовых оптических элементов является важным преимуществом голографических интерферометров. Их основной недостаток заключается в том, что качество изготовления синтезированных голограмм, отвечающих за достоверность результатов контроля, трудно проверить традиционными методами, а специальные методы контроля голограмм либо сложны, либо недостаточно надежны.

Оптические схемы голографических интерферометров и области их применения описаны в специальной литературе [5, 6, 12].

ТЕНЕВЫЕ ПРИБОРЫ

Работа теневых приборов основана на теневом методе. В 1856 г. Леон Фуко предложил метод исследования качества оптических поверхностей и систем, сыгравший огромную роль в опти-

ческом приборостроении, — теневой метод. В этом методе высокая чувствительность сочетается с чрезвычайной простотой выполнения и наглядностью. По утверждению Д. Д. Максимова, внесшего значительные усовершенствования в метод Фуко, можно без особого труда обнаружить дефекты отражающей поверхности порядка $1/50$ длины волны света, а в предельном случае — $1/200$ [9]. Однако теневой метод Фуко практически не позволяет количественно оценить погрешности поверхности, что является недостатком метода.

Метод Фуко теоретически применим для исследования любой оптической системы, из которой выходит сферический или близкий к нему по форме волновой фронт. Первоначально метод применялся для контроля формы вогнутых сферических поверхностей большого диаметра, а в дальнейшем нашел применение для контроля формы асферических поверхностей, качества объективов, сложных оптических систем, неоднородностей оптического стекла и т. п.

Сущность метода Фуко заключается в следующем (рис. 83). Пусть в центре кривизны C сферического зеркала 1 установлен точечный источник света или его изображение. Если зеркало имеет идеальную сферическую форму, то после отражения от него лучи вновь вернуться в точку C , образуя строго гомоцентрический пучок лучей. Расположим глаз 3 наблюдателя таким образом, чтобы все отраженные лучи прошли через зрачок глаза и достигли сетчатки. В этом случае наблюдатель увидит равномерно освещенную поверхность зеркала. Расположим вблизи точки C непрозрачный экран 2 с острым краем (например, лезвие безопасной бритвы). Такой экран получил название «нож Фуко» или просто нож. Начнем перемещать нож в направлении, перпендикулярном к оси пучка (показано стрелкой), глаз находится в прежнем положении. При передвижении ножа в положение I по мере перекрытия лучей наблюдатель увидит движение тени слева направо; в правой части рис. 84 показан вид теневой картины для положения I в момент касания лезвием ножа оси пучка. Если нож находится в положении II , то наблюдатель видит то же явление, но в обратной последовательности.

Если нож находится в положении III (точно против центра кривизны зеркала), то при движении его слева направо происходит не мгновенное, а лишь очень быстрое и равномерное по всей поверхности зеркала понижение освещенности. Объясняется это тем, что изображение точки

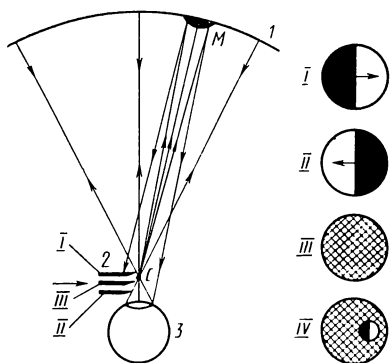


Рис. 83. Схема образования теневых картин по методу Фуко

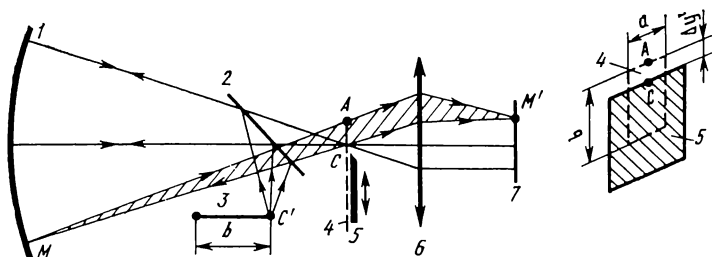


Рис. 84. Схема реализации метода Фуко—Филбера

вследствие дифракционных явлений представляет собой «кружок Эри» — диск конечных, хотя и очень малых размеров. Очевидно, если нож полностью перекроет этот диск, то наблюдатель вообще не увидит зеркала.

Предположим теперь, что на поверхности зеркала имеется деформированный участок M в виде бугра, а нож находится в чувствительном положении *III*. Наблюдатель увидит поверхность зеркала в целом равномерно освещенной, кроме участка M , у которого правая часть окажется светлой, а левая — темной, так как отраженные лучи от правой половины бугра попадают в глаз, а от левой — задерживаются ножом. Возникает характерная теневая картина (положение *IV*), позволяющая определить протяженность деформированного участка M и его положение на поверхности зеркала.

Д. Д. Максудов усовершенствовал метод Фуко, заменив точечный источник света узкой щелью, а нож — нитью, в результате чего повысился контраст теневой картины и чувствительность метода значительно возросла.

Долгие годы многие исследователи пытались превратить теневой метод Фуко в количественный метод. Лишь в 1967 г. эту задачу удалось решить Филберу [2]. С тех пор модифицированный метод Фуко называют методом Фуко—Филбера. Сущность усовершенствований Филбера заключается в следующем.

Вместо источника света в виде точечного отверстия или узкой щели применен источник света в виде прямоугольника, одна сторона которого значительно больше другой («полубесконечный» прямоугольник). Малая сторона (ширина) прямоугольника имеет тот же размер, что и длина щели в классическом методе Фуко. Яркость источника света в методе Фуко—Филбера должна быть строго одинакова во всех его участках.

При контроле формы сферического зеркала 1 (рис. 84) источник света 3 ориентируют так, чтобы длинная сторона b прямоугольника располагалась перпендикулярно к оси зеркала, а широкая сторона прямоугольника располагалась вблизи центра кривизны C зеркала. Полупрозрачная пластина 2 обеспечивает оптическое сопряжение центра кривизны C и его изображения C' с источником

света 3. Изображение 4 светящегося прямоугольника перекрывается ножом 5.

Объектив 6 строит изображение поверхности зеркала 1 в плоскости 7.

Если сферическое зеркало 1 имеет идеальную форму, теневая картина изображения зеркала имеет равномерную освещенность. Если на поверхности зеркала вокруг точки M имеется деформированный участок, то лучи света после отражения от него пойдут иным путем. В плоскости ножа отраженный от зеркала луч будет иметь поперечную абберацию $\Delta y' = AC$. Таким образом, выдвижение изображения источника света из-под ножа, построенное деформированным участком поверхности, оказывается равным поперечной сферической абберации $\Delta y'$. Лучи света, строящие изображение деформированного участка M , проходят через прямоугольную площадку со сторонами a и $\Delta y'$.

Эта площадка служит своеобразным входным зрачком объектива 6, поэтому освещенность теневой картины вокруг точки M оказывается строго пропорциональной поперечной абберации, вызванной деформацией участка поверхности вокруг точки M . На этом основана идея Филбера: измерив освещенность теневой картины в диаметральной сечении, перпендикулярном к кромке ножа, можно определить поперечные абберации зеркала. Интегрирование поперечных аббераций дает возможность определить форму волнового фронта в одном диаметральной сечении зеркала и, следовательно, отклонение реальной поверхности зеркала от идеальной. Таким образом, метод Фуко—Филбера по своей физической сути является фотометрическим методом.

Другим важным усовершенствованием, предложенным Филбером, было использование телевизионной техники. Теневая картина строится на сигнальной пластине телевизионной передающей трубки с помощью объектива, сфокусированного на контролируемое зеркало. Телевизионный кадр от передающей трубки поступает на видеоконтрольное устройство, что позволяет количественно оценить погрешности формы зеркала.

С помощью промышленного осциллографа, имеющего блок выделения телевизионной строки, можно на экране осциллографа получить кривую поперечной абберации любой хорды на оптической поверхности, перпендикулярной к кромке ножа. При этом важно, что профиль поперечных аббераций получается в виде электрического сигнала; это дает возможность интегрировать его с помощью аналоговой электрической цепочки и также вывести на экран осциллографа, т. е. получить либо волновые абберации зеркала, либо отклонение его формы от идеальной сферы.

Недостатки метода Фуко—Филбера заключаются в следующем. Так как метод является фотометрическим, неравномерность коэффициента отражения различных участков исследуемой поверхности воспринимается как погрешность формы поверхности. Кроме того, за один прием можно определить профиль поверхности

лишь в одном диаметрально сечении; для других профилей зеркало или теневой прибор необходимо повернуть вокруг оптической оси.

В нашей стране теневой метод Фуко—Филбера был реализован с помощью приборов «Тень» [2], которые нашли практическое применение для исследования астрономических зеркал диаметром 2,6 и 6 м. Несмотря на полезные усовершенствования Филбера, теневой метод уступает интерферометрическому по многим показателям. Основное преимущество интерферометрического метода перед теневым заключается в том, что он дает полную и наглядную информацию сразу о всей исследуемой поверхности. Интерферометрический метод по своей сути является количественным и достаточно точным, поэтому результаты измерений легко поддаются автоматизированной обработке на ЭВМ. Состояние исследуемой поверхности (например, неравномерность коэффициента отражения) практически не влияет на результаты интерферометрического контроля.

4. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В настоящее время асферические поверхности (АП) получают все более широкое распространение во всех категориях оптических систем [15]. Применение АП вместо сферических во многих случаях позволяет существенно улучшить качество оптического изображения, повысить оптические характеристики и упростить конструкцию приборов, что влечет за собой уменьшение их габаритных размеров и массы. Последнее обстоятельство особенно важно для оптических приборов, применяемых в ракетной технике и для научных исследований в космосе. Однако широкому распространению АП препятствуют трудности, связанные с их изготовлением и контролем. Хотя требования к качеству изготовления АП в большинстве случаев те же, что и для сферических, известные методы контроля сферических поверхностей либо малопригодны, либо принципиально неприменимы для контроля АП. Это потребовало создания новых методов, специально предназначенных для контроля формы АП [12, 14].

Чаще всего в оптических системах применяют поверхности вращения (рис. 85), причем начало прямоугольных координат Y , Z совмещают с вершиной O АП, а осью вращения (симметрии) — с оптической осью системы (ось Z). Для изучения свойств АП достаточно задать уравнения ее меридианного сечения. В этих случаях наиболее употребительные виды АП могут быть заданы уравнениями плоских кривых в координатах y , z , определяющих профиль АП:

$$y^2 = a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n; \quad (63)$$

$$z = A_1 y^2 + A_2 y^4 + \dots + A_n y^{2n}. \quad (64)$$

В уравнении (63) коэффициент $a_1 = 2r_0$, где r_0 — радиус кривизны при вершине АП (см. рис. 85) или вершинный радиус АП с центром в точке C_0 ; соответственно в уравнении (64) коэффициент $A_1 = 1/(2r_0)$ определяет кривизну при вершине АП. Отсутствие первого члена в уравнении (64) является признаком planoидной АП, для которой вершинный радиус $r_0 = \infty$.

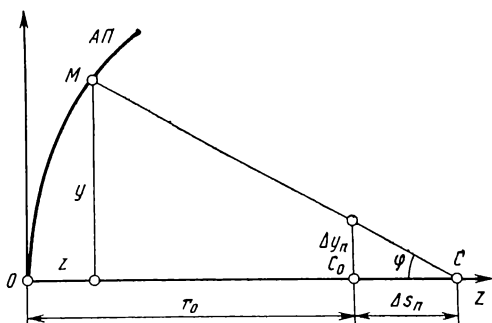


Рис. 85. Геометрические параметры АП вращения

В отличие от нормалей сферы нормали АП образуют негомоцентрический пучок, т. е. пересекают ось Z в разных точках и под различными углами φ . Назовем отрезок C_0C (см. рис. 85) от точки C пересечения нормали с осью до центра кривизны C_0 при вершине АП продольной абберацией Δs_n нормали по аналогии с продольной абберацией луча, принадлежащего негомоцентрическому пучку. Аналогично поперечная абберация нормали $\Delta y_n = \Delta s_n \operatorname{tg} \varphi$. Таким образом, для каждой точки M асферической поверхности с координатами y, z могут быть однозначно определены значения $\varphi, \Delta s_n$ (или Δy_n), характеризующие АП. Из аналитической геометрии известно, что тангенс угла наклона нормали MC к оси можно вычислить по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = 2y(a_1 + 2a_2z + \dots + na_nz^{n-1})^{-1}. \quad (65)$$

Очевидно (рис. 85), что отрезок

$$\begin{aligned} \Delta s_n = z + y \operatorname{ctg} \varphi - r_0 = (1 + a_2)z + \\ + 0,5(3a_3z^2 + 4a_4z^3 + \dots + na_nz^{n-1}). \end{aligned} \quad (66)$$

Уравнения (65) и (66) в параметрическом виде определяют зависимость Δs_n от φ . Если АП является поверхностью второго порядка, т. е. $a_1 = 2r_0, a_2 = \varepsilon^2 - 1$ (ε — эксцентриситет кривой второго порядка), $a_3 = a_4 = \dots = a_n = 0$, то уравнения (66) и (65) примут вид

$$\Delta s_n = \varepsilon^2 z; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{2r_0z + (\varepsilon^2 - 1)z^2}}{r_0 + (\varepsilon^2 - 1)z}, \quad (67)$$

откуда можно получить

$$\Delta s_n = \frac{r_0 \varepsilon^2}{\varepsilon^2 - 1} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (\varepsilon^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varphi}} - 1 \right]. \quad (68)$$

Разложив в ряд выражение, стоящее в квадратных скобках зависимости (68), получим

$$\Delta s_n = \frac{r_0 \varepsilon^2}{2} \left[\operatorname{tg}^2 \varphi + \frac{3}{4}(\varepsilon^2 - 1) \operatorname{tg}^4 \varphi + \frac{5}{8}(\varepsilon^2 - 1)^2 \operatorname{tg}^6 \varphi + \dots \right]. \quad (69)$$

Для параболической поверхности ($\epsilon = 1$) из выражения (69) следует простая и точная формула

$$\Delta s_n = \frac{r_0}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi = f \operatorname{tg}^2 \varphi, \quad (70)$$

где f — фокусное расстояние отражающей параболической поверхности.

Приведенные формулы удобно использовать для определения асферичности поверхности и градиента асферичности [14], а также для расчета компенсаторов, предназначенных для контроля формы АП компенсационным методом.

КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ АП

Эти методы основаны на измерении геометрических параметров АП и реализуются главным образом с помощью механических устройств (шаблонов, калибров, сферометров, полярных компараторов и др.). Контактные методы чаще всего применяют для технологического контроля формы АП. Основное преимущество методов заключается в том, что они позволяют контролировать шлифованные поверхности, для которых неприменимы оптические методы. Недостатки методов этой группы очевидны: невысокая точность (1 ... 5 мкм) и контакт измерительного инструмента с поверхностью, в результате чего последняя может быть повреждена.

Для контроля профиля выпуклых АП в цеховых условиях используют полярные компараторы (рис. 86). Сущность измерений заключается в определении полярных координат (радиуса-вектора ρ и полярного угла φ) контролируемой поверхности 1 с помощью измерительного стержня 2, перемещающегося вдоль своей оси и вращающегося вокруг полюса C . Стержень 2 имеет шкалу, расстояние перемещения стержня измеряется с помощью микроскопа 3.

Разработаны компараторы с фотоэлектрической системой отсчета. Для уменьшения погрешности измерений полюс C целесообразно располагать в центре кривизны сферы, ближайшей к АП. Точность измерений сравнительно невысокая. Например, для измерения профиля параболоида с вершинным радиусом 100 мм с погрешностью, не превышающей ± 1 мкм, необходимо обеспечить измерения полярного угла φ с погрешностью не более $\pm 5''$ при $\varphi = 45^\circ$ и $\pm 2''$ при $\varphi = 60 \dots 90^\circ$.

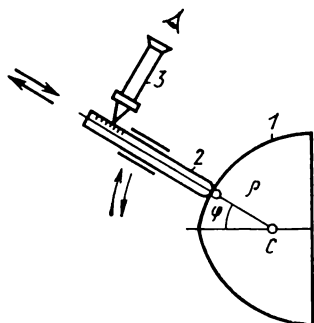


Рис. 86. Схема измерения профиля АП на полярном компараторе

Особое место среди контактных методов контроля АП занимает метод пробных стекол, широко применяемый для контроля сферических поверхностей. Этот метод находит ограниченное применение для контроля формы АП. Объясняется это трудностью изготовления такого пробного стекла, которое имело бы точную и обратную контролируемой детали форму поверхности, а также более сложными приемами пользования асферическим пробным стеклом, так как необходимо точное совмещение осей эталонной и контролируемой поверхностей. Однако, несмотря на эти трудности, асферические пробные стекла применяют для контроля серийно выпускаемых АП, так как в этом случае их изготовление оправдано экономически.

Методика определения погрешностей АП, контролируемых асферическим пробным стеклом, аналогична методике, применяемой для сферических поверхностей.

МЕТОД АНАБЕРРАЦИОННЫХ ТОЧЕК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОТРАЖАЮЩИХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Поверхности, образованные вращением кривых второго порядка, имеют замечательное свойство: геометрические фокусы этих кривых являются анаберрационными точками. Это означает, что все лучи света, выходящие из одного геометрического фокуса, после отражения от поверхности собираются в одной точке, являющейся вторым геометрическим фокусом. Следовательно, геометрические фокусы являются оптически сопряженными идеальными точками.

Идея использования анаберрационных точек для контроля поверхностей вращения второго порядка заключается в следующем. Если поверхность имеет идеальную форму и точечный источник света расположен в одном из геометрических фокусов, то отраженные от поверхности лучи образуют сферический волновой фронт, центр кривизны которого совпадает с другим геометрическим фокусом. Различные методы контроля, основанные на использовании анаберрационных точек, по существу сводятся к исследованию тем или иным способом сферического волнового фронта, образованного отраженными от поверхности лучами.

Способы исследования волнового фронта весьма разнообразны и могут основываться на различных законах геометрической и физической оптики. Интерференционные методы исследования волнового фронта требуют, как правило, создания автоколлимационной системы с помощью дополнительного плоского или сферического зеркала, центр кривизны которого совмещается с одним из геометрических фокусов контролируемой поверхности. С другим фокусом поверхности совмещается точечный источник света или его изображение. Таким образом, три элемента автоколлимационной системы: точечный источник света (или объектив, создающий

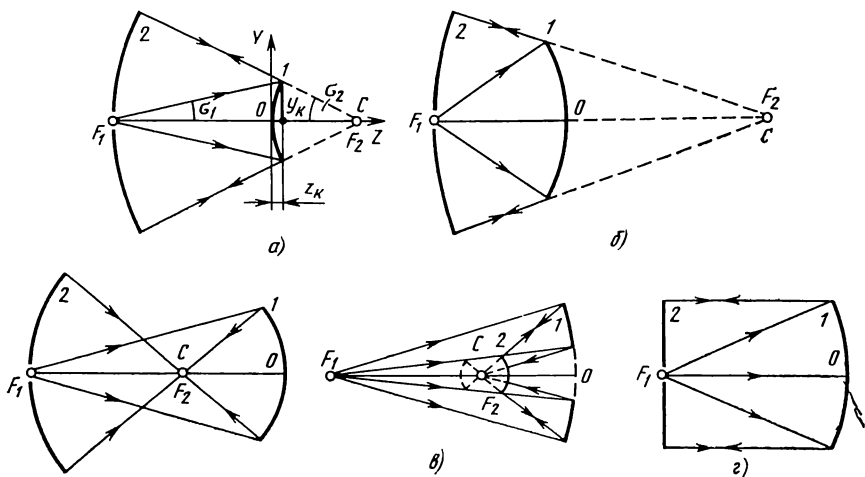


Рис. 87. Автоколлимационные системы для контроля формы ЛП второго порядка: а, б — соответственно выпуклых и вогнутых гиперболических; в — вогнутых эллиптических; г — вогнутых параболических; C — центр кривизны автоколлимационного зеркала 2

его изображение), контролируемая поверхность и автоколлимационное зеркало должны занимать определенное взаимное положение. Различные автоколлимационные системы для выпуклых и вогнутых поверхностей вращения второго порядка приведены на рис. 87.

Поскольку автоколлимационная система формирует на выходе из нее сферический волновой фронт, для исследования его формы может быть использован практически любой метод, предназначенный для контроля формы сферических поверхностей, например, интерференционный, голографический, теневой метод Фуко, метод Гартмана и др.

Рассмотрим методику расчета геометрических параметров автоколлимационной системы на примере выпуклой гиперболической поверхности (рис. 87, а). Исходными данными для расчета служат вершинный радиус r_0 , эксцентриситет ε и световой диаметр D контролируемой поверхности 1. До начала вычислений целесообразно определить для крайней точки поверхности значение z_k , соответствующее значению $y_k = D/2$, используя приближенную формулу $z_k \approx y_k^2/(2r_0)$, а затем, если необходимо, уточнить значение z_k , решив квадратное уравнение

$$y_k^2 = 2r_0 z_k + (\varepsilon^2 - 1) z_k^2.$$

Положение геометрических фокусов F_1 и F_2 относительно вершины 0 контролируемой поверхности 1 можно определить по формуле

$$OF_{1,2} = \left| \frac{r_0}{\varepsilon \pm 1} \right|,$$

где знак плюс или минус берут в зависимости от вида поверхности. Например, для выпуклых гиперболических поверхностей (рис. 87, а)

$$OF_1 = r_0/(\varepsilon - 1), OF_2 = r_0/(\varepsilon + 1),$$

для вогнутых гиперболических поверхностей (рис. 87, б)

$$OF_1 = \frac{|r_0|}{\varepsilon + 1}, OF_2 = \frac{|r_0|}{\varepsilon - 1};$$

для вогнутых эллиптических поверхностей (рис. 87, в)

$$OF_1 = \frac{|r_0|}{1 - \varepsilon}, OF_2 = \frac{|r_0|}{1 + \varepsilon};$$

для вогнутых параболических поверхностей (рис. 87, г)

$$OF_1 = f = |r_0|/2.$$

Для выпуклых гиперболических АП (рис. 87, а) апертурные углы σ_1 и σ_2 в геометрических фокусах F_1 и F_2 вычисляют по формулам

$$\operatorname{tg} \sigma_1 = y_K/(OF_1 + z_K); \quad \operatorname{tg} \sigma_2 = y_K/(OF_2 - z_K).$$

Из рис. 87 следует, что радиус сферического автоколлимационного зеркала 2 приблизительно равен расстоянию между геометрическими фокусами:

$$R \approx F_1 F_2 = \left| \frac{2r_0\varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} \right|.$$

Диаметр сферического зеркала можно вычислить, зная апертурный угол σ_2 :

$$D_{\text{сф}} = 2R \sin \sigma_2.$$

Аналогичным способом рассчитывают параметры других автоколлимационных систем, приведенных на рис. 87.

Пример. Рассчитать параметры автоколлимационной системы для контроля формы выпуклой гиперболической поверхности, у которой $r_0 = 100$ мм, $\varepsilon = 1,5$, $D = 20$ мм.

Крайняя точка поверхности имеет координаты $y_K = 10$ мм, $z_K \approx 0,5$ мм. Вычислим положение геометрических фокусов и соответствующих им апертурных углов:

$$OF_1 = \frac{r_0}{\varepsilon - 1} = 200 \text{ мм};$$

$$OF_2 = \frac{r_0}{\varepsilon + 1} = 40 \text{ мм};$$

$$\operatorname{tg} \sigma_1 = \frac{y_K}{OF_1 + z_K} = 0,04988;$$

$$\operatorname{tg} \sigma_2 = \frac{y_K}{OF_2 - z_K} = 0,25316.$$

Радиус сферического зеркала $R \approx F_1 F_2 = 240$ мм, диаметр $D_{\text{сф}} = 2R \sin \sigma_2 = 117,8$ мм.

Метод анаберрационных точек, реализуемый с помощью автоколлимационных систем, имеет высокую чувствительность ввиду того, что лучи света дважды отражаются от контролируемой АП и, следовательно, ее погрешности переносятся на волновой фронт учетверенными. Однако это же обстоятельство является и недостатком метода, так как требует нанесения зеркального покрытия на контролируемую поверхность. Другой недостаток метода заключается в необходимости изготовления высокоточного сферического зеркала, диаметр которого иногда в несколько раз превышает диаметр АП. Это исключает возможность применения метода анаберрационных точек для контроля АП больших диаметров, например, астрономических зеркал. Кроме того, метод принципиально неприменим для контроля формы АП высших порядков.

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

Трудности контроля АП, обладающих в общем случае большими аберрациями, заставили искать различные пути решения этой задачи. Наиболее простой и естественный путь — применить известные методы оценки качества изображения совершенных оптических систем для контроля АП, создать такие условия, в которых контролируемая АП совместно с простейшими дополнительными элементами образовала бы оптическую систему, близкую к идеальной. Это и положено в основу компенсационного метода, в котором действие АП как источника больших аберраций, вызывающих сильное искажение волнового фронта, компенсируется либо дополнительными оптическими элементами, либо особым положением источника света (предметной точки) относительно АП.

Сущность метода, основанного на компенсации аберраций нормалей АП, заключается в том, что вся совокупность лучей, выходящих из дополнительной оптической системы — компенсатора, полностью совпадает с нормальными к контролируемой АП. Пусть на линзу 1 (рис. 88), выполняющую роль компенсатора, падает гомоцентрический пучок лучей (параллельный или расходящийся). Параметры компенсатора рассчитаны таким образом, что любой луч, выходящий из него, падает нормально к асферической поверхности 2, и после отражения от нее повторяет свой путь в обратном направлении. С точки зрения теории аберраций это означает, что кривая сферической аберрации компенсатора полностью совпадает с кривой аберрации нормалей АП, при этом центр кривизны C_0 при вершине АП совмещен с параксиальным фокусом F'_0 компенсатора. С точки зрения волновой оптики компенсатор преобразует падающий на него плоский или сферический волновой фронт в асферический, совпадающий с теоретической формой контролируемой АП. Волновой фронт, выходящий из компенсатора, служит как бы своеобразным пробным стеклом, налагаемым на контролируемую АП.

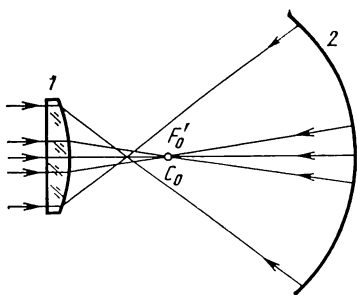


Рис. 88. Ход лучей в компенсационной системе контроля АП

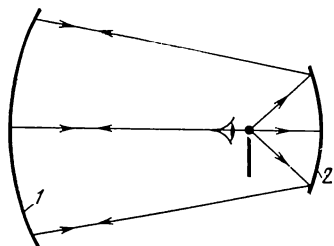


Рис. 89. Схема Д. Д. Максудова для контроля параболического зеркала 1 с помощью сферического зеркала 2

Расчет компенсатора с заданной кривой сферической аберрации не является новой задачей в вычислительной оптике и значительно облегчается теми обстоятельствами, что компенсатор используется в монохроматическом свете, а аберрации наклонных пучков отсутствуют.

Такова сущность компенсационного метода, основанного на компенсации аберраций нормалей АП. Этот вид компенсации впервые был предложен и практически применен в 1921 г. академиком В. П. Линником для контроля вогнутого параболического зеркала с помощью теневого устройства и компенсатора, состоящего из двух линз. В 1924 г. Д. Д. Максудов предложил компенсационную схему исследования качества вогнутых поверхностей второго порядка с помощью теневого устройства и значительно меньшего по диаметру вогнутого сферического зеркала, выполняющего роль компенсатора (рис. 89).

Как известно, теневые методы контроля имеют очень высокую чувствительность, но позволяют оценить погрешности поверхности только с качественной стороны. Применение компенсационного метода в схеме интерферометра, предложенного и впервые осуществленного в нашей стране в 1962 г. [14], позволило оценить качество контролируемых АП как с качественной, так и с количественной стороны. Это обстоятельство особенно важно для технологии изготовления АП. Кроме того, компенсационный метод в настоящее время является единственным, который позволяет контролировать АП не только второго, но и высших порядков.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Преимущества компенсационного метода контроля АП перед другими методами наиболее наглядно проявляются при контроле астрономических зеркал крупных телескопов.

В 1974 г. в нашей стране вступил в эксплуатацию большой азимутальный телескоп с главным зеркалом диаметром 6 м и фо-

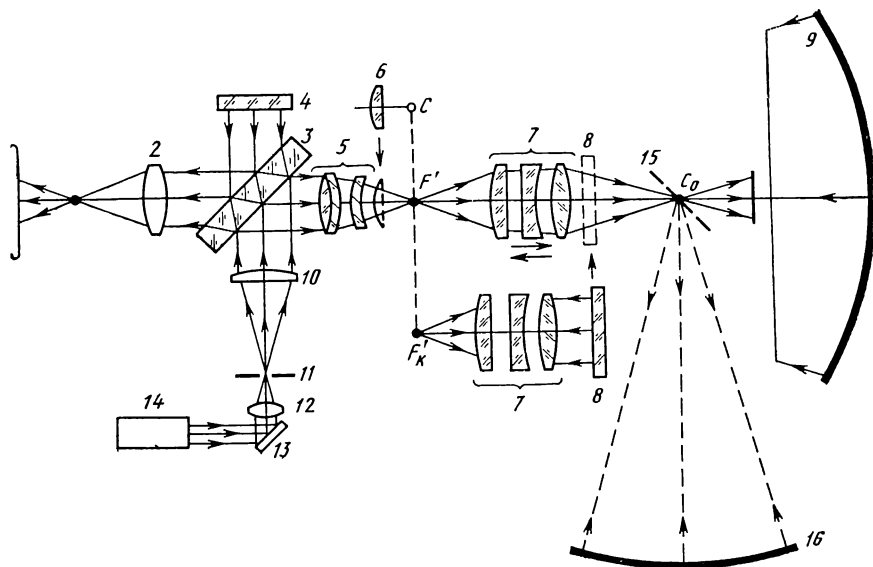


Рис. 90. Оптическая схема интерферометра ИКАП-2 для контроля астрономических зеркал

кусным расстоянием 24 м. Наша промышленность располагала двумя заготовками зеркала, поэтому сразу после установки в телескоп первого зеркала была начата обработка рабочей поверхности второго зеркала в целях получения более точной поверхности. В связи с тем, что качество поверхности второго зеркала оказалось значительно выше, чем первого, в 1979 г. первое главное зеркало большого азимутального телескопа (БТА) было заменено вторым. Испытания в условиях обсерватории подтвердили целесообразность такой замены.

Основным методом технологического и аттестационного контроля второго главного зеркала БТА был выбран интерференционный метод, реализуемый на интерферометре ИКАП-2 многоцелевого назначения. В рабочей ветви интерферометра был установлен универсальный компенсатор, позволяющий контролировать параболические, гиперболические и эллиптические зеркала.

Оптическая схема лазерного интерферометра ИКАП-2 (рис. 90) построена по схеме интерферометра Тваймана—Грина с видоизмененной рабочей ветвью. Источником света в интерферометре служит гелий-неоновый лазер 14. Лучи света, выходящие из лазера, отклоняются плоским зеркалом 13 и фокусируются линзой 12 в отверстие диафрагмы 11, установленное в фокусе линзы 10, выполняющей роль объектива коллиматора. Линзы 12 и 10 образуют телескопическую систему Кеплера. Она служит для расширения пучка лучей, выходящего из лазера, и уменьшения его расходимости. Пучок параллельных лучей, выходящий из линзы 10, поступает на светоделитель 3, представляющий собой

толстую плоскопараллельную пластину. На одну из граней пластины нанесено полупрозрачное покрытие, поэтому пучок лучей, падающий на пластину, расщепляется на два пучка. Один из них направляется к эталонному плоскому зеркалу 4, второй — в рабочую ветвь интерферометра. В ней расположены объектив 5, эталонное сферическое зеркало 6, универсальный компенсатор 7, эталонное плоское зеркало 8, съемное наклонное зеркало 15 и контролируемые зеркала 9 и 10. Дальнейший ход лучей в рабочей ветви интерферометра ясен из рис. 90. Для регистрации интерференционной картины служит фотографический объектив 2 (см. рис. 90) и фотопленка 1.

Наиболее важным узлом рабочей ветви интерферометра является универсальный компенсатор 7. Он состоит из трех линз, разделенных воздушными промежутками. Первая по ходу лучей (выпукло-плоская) и вторая (плоско-выпуклая) линзы имеют равные радиусы сферических поверхностей. Поэтому в процессе изготовления линз качество их сферических и плоских поверхностей проверялось взаимным наложением аналогично тому, как проверяется качество оптических поверхностей пробными стеклами. Благодаря этому удается изготовить линзы, поверхности которых практически не вносят погрешностей в результаты основного контроля. Заготовки оптического стекла для изготовления линз компенсатора тщательно проверяют на оптическую однородность по всему объему стекла. Это удается осуществить сравнительно просто, так как световые диаметры указанных линз соответственно равны 87, 84 и 115 мм.

Если на компенсатор направить осевой параллельный пучок лучей со стороны двояковыпуклой линзы, то на выходе из компенсатора образуется пучок лучей, остаточная волновая аберрация которого не превышает значения $\lambda/4$ в плоскости наилучшего изображения. Это свойство дает возможность проверить качество изготовления компенсатора на интерферометре с помощью эталонного плоского зеркала 8, совместив предварительно задний фокус F' объектива 5 с задним фокусом F'_k компенсатора. Методика контроля компенсатора принципиально не отличается от известной методики контроля качества фотографических объективов. Кроме того, до установки компенсатора на интерферометр его проверяют по виду дифракционного изображения кружка Эйри с помощью коллиматора и микроскопа в целях выявления возможных децентрировок линз.

Достоверность результатов контроля с помощью компенсатора зависит не только от качества изготовления линз компенсатора и их взаимной центрировки, но и от правильности установки компенсатора относительно объектива и контролируемого зеркала. Компенсатор рассчитан так, что в основной схеме применения (для контроля главного зеркала БТА) задний фокус F' объектива 5 совмещен с передним фокусом выпуклой поверхности первой линзы компенсатора. Поэтому между сферическими по-

верхностями первой и второй линз компенсатора вблизи оси лучи света идут параллельно оптической оси компенсатора.

Все поверхности линз компенсатора, за исключением центральной зоны диаметром 20 мм на плоской поверхности второй линзы, имеют просветляющее покрытие. Непросветленная центральная зона использована в качестве плоского зеркала для получения опорной интерференционной картины. При правильном расположении компенсатора 7 относительно объектива 5 в центральной зоне наблюдаются 1—2 интерференционных кольца круглой формы. Благодаря этому удастся сравнительно просто и в то же время с очень высокой точностью установить компенсатор в правильное положение относительно объектива, а затем, перемещая интерферометр как единое целое относительно контролируемого зеркала 9, установить его в правильное положение. При этом используется интерференционная картина от всей контролируемой поверхности зеркала.

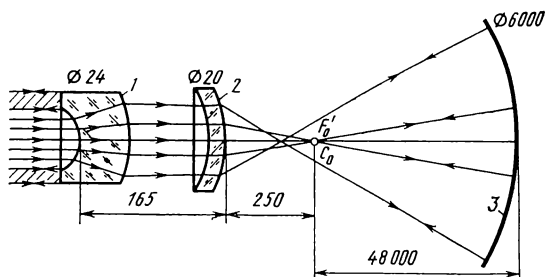
Используя указанную особенность конструкции компенсатора, в любой момент процесса контроля можно убедиться в том, что юстировка не нарушилась. Процедура юстировки не является трудоемкой, так как компенсатор имеет сравнительно малые габаритные размеры: длина компенсатора по оси равна 280 мм, внешний диаметр оправы 140 мм, масса оптических деталей компенсатора не превышает 2 кг.

В основной схеме применения отклонение волнового фронта, создаваемого компенсатором, от теоретической формы параболоида не превышает значения $\lambda/30$. Компенсатор, использованный для контроля главного зеркала БТА, рассчитан на длину волны гелий-неонового лазера ($\lambda = 632,8$ нм). Однако он может быть использован для теневого контроля с любым монохроматическим источником света видимой области спектра, в частности, с ртутной ($\lambda = 546,1$ нм) и натриевой ($\lambda = 589,3$ нм) лампами, при этом конструкция компенсатора остается неизменной, а аберрационные характеристики не ухудшаются. В небольших пределах изменяется лишь положение компенсатора относительно источника света и контролируемого зеркала.

Расчеты на ЭВМ показали, что компенсатор пригоден для высокоточного контроля параболических зеркал с относительными отверстиями 1 : 4 ... 1 : 2,8 и диаметрами 6000 ... до 500 мм; гиперболических зеркал с эксцентриситетами 1,1 ... 1,3 и диаметрами 3000 ... 500 мм; эллиптических зеркал с эксцентриситетами 0,316 ... 0,948 в различном сочетании с диаметрами 6000 ... 500 мм, а также для контроля асферических поверхностей высших порядков, мало отличающихся от асферических поверхностей второго порядка.

Конструкция рабочей ветви интерферометра и его юстировка значительно упрощаются, если в рабочей ветви установлен компенсатор, преобразующий плоский волновой фронт в асферический (рис. 91). В этом случае нет необходимости в применении

Рис. 91. Схема рабочей ветви интерферометра ИКАП-2 с компенсатором, преобразующим плоский волновой фронт в асферический



объектива, формирующего сферический волновой фронт, что повышает достоверность контроля.

Компенсатор состоит из двух линз: афокальной 1 и положительной менисковой 2. Воздушный промежуток между линзами позволяет устранить сферическую aberrацию высших порядков, не нарушая коррекцию в области aberrаций третьего порядка. Для удобства юстировки компенсатора в рабочей ветви интерферометра афокальная линза 1 имеет плоскую фаску, на которую падает параллельный пучок лучей (заштрихован на рис. 92). Это позволяет контролировать правильность установки компенсатора как по автоколлимационному отражению лучей от плоской фаски, так и по интерференционной картине, возникающей на этой же плоской фаске. Компенсатор, специально предназначенный для контроля параболической поверхности 3 (см. рис. 91) главного зеркала БТА, имеет небольшие габаритные размеры, причем отклонение волнового фронта, создаваемого компенсатором, от теоретической формы параболоида, не превышает значения $\lambda/600$. Фокусное расстояние компенсатора равно 108 мм. Если со стороны менисковой линзы на компенсатор падает осевой параллельный пучок лучей, то волновая aberrация компенсатора не превышает значения $\lambda/4$, что дает возможность проверить качество изготовления линз компенсатора и его сборки интерференционным методом.

Интерферометр ИКАП-2 можно использовать для контроля астрономических зеркал как при горизонтальном, так и при вертикальном расположении их оптической оси. При вертикальном расположении оси контролируемого зеркала 16 включают плоское зеркало 15 (см. рис. 90), которое отклоняет пучок лучей, выходящий из компенсатора 7, к зеркалу 16.

МЕТОД ГАРТМАНА

В 1904 г. И. Гартман разработал количественный метод измерения остаточных aberrаций совершенных оптических систем, в частности, зеркальных и зеркально-линзовых астрономических объективов. Метод основан на законах геометрической оптики, весьма просто осуществляется на практике без применения дополнительных оптических элементов и в то же время имеет достаточно высокую точность. Метод Гартмана часто используют

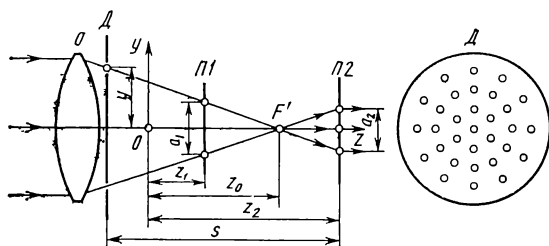


Рис. 92. Схема получения Гартманограмм при исследовании объектива по методу Гартмана

в обсерваториях для контроля качества главных зеркал телескопов и оптических систем телескопов в целом, при этом источнике света служат звезды.

Рассмотрим сущность метода на примере исследования объектива O (рис. 92), создающего в общем случае негемоцентрический пучок лучей. За объективом устанавливают диафрагму D Гартмана — непрозрачный экран с отверстиями, симметрично расположенными по зонам выходного зрачка. За диафрагмой устанавливают фотопластинку последовательно в два положения: предфокальное $\Pi 1$ и зафокальное $\Pi 2$, причем расстояние $z_2 - z_1$ между ними должно быть точно измерено. При фотографировании удаленного источника света, например звезды, лучи света пройдут через отверстия диафрагмы D узкими пучками и оставят на фотопластинках следы в виде пятен малого диаметра. Центр каждого пятна можно принять за точку пересечения луча, проходящего через центр отверстия диафрагмы Гартмана. Проявленные фотопластинки называют *гартманограммами*. Измерив на гартманограммах координаты точек пересечения лучей с фотопластинками, на основании известных геометрических параметров схемы можно определить сферическую aberrацию исследуемого объектива, положение заднего фокуса F' , построить карту волнового фронта, вычислить распределение энергии в кружке рассеяния объектива. Расположим начало прямоугольных координат YOZ на оптической оси объектива на некотором расстоянии от него так, чтобы ось Z совпала с оптической осью. Измерив на гартманограммах расстояния a_1 и a_2 для зоны y диафрагмы D , из очевидных геометрических соотношений можно определить положение фокуса F' объектива:

$$z_0 = z_1 + \frac{a_1}{a_1 + a_2} (z_2 - z_1).$$

Аналогично можно найти значения $z_0 = f(y)$ для других зон объектива; эта зависимость в сущности представляет собой сферическую aberrацию объектива. Если зависимость $z_0 = f(y)$ оказывается различной для разных диаметральных сечений объектива, то это указывает на наличие астигматизма. Среднее положение фокуса F' можно определить по формуле

$$z_{cp} = \frac{\sum y z_0}{\sum y}.$$

Диаметры отверстий диафрагмы Гартмана и положения фотопластинок должны быть выбраны из следующих соображений. Если диаметры отверстий велики, то пятна на негативе могут соединиться, что недопустимо. Если диаметры отверстий малы, то размеры пятен, обусловленные дифракционными явлениями, окажутся недопустимо большими. М. Ф. Романова рекомендует применять отверстия диаметром $d = f'/500$, располагая их на расстояниях $l \geq 0,005f'$ одно от другого, а зафокальный и предфокальный снимки делать на расстояниях

$$z_0 - z_1 = \frac{f'}{\frac{2\pi}{15\lambda} l \frac{f'}{s} + 1}; \quad z_0 - z_2 = \frac{f'}{\frac{2\pi}{15\lambda} l \frac{f'}{s} - 1},$$

где s — расстояние от диафрагмы до фокуса.

Диаметр кружка рассеяния объектива, составляющий сотысячные доли фокусного расстояния f' объектива, можно вычислить по формуле

$$T = \frac{200\,000}{(f')^2} \frac{\sum y^2 (z_0 - z_{cp})}{\sum y}.$$

Особенность этой формулы заключается в том, что поперечным аберрациям каждой зоны y приписывается вес, пропорциональный площади этой зоны. Величина T называется *технической постоянной*, или *постоянной Гартмана* объектива, и характеризует его качество. Если $T < 0,5$, то объектив можно считать первоклассным; если $T < 1,5$ — хорошим, и если $T < 2,5$ — удовлетворительным. Однако эти критерии носят условный характер и с течением времени пересматриваются.

Следует иметь в виду, что метод Гартмана не дает сведений о местных погрешностях исследуемого объектива или зеркала. Теория метода Гартмана основывается на предпосылке, что объектив имеет только зональные симметричные аберрации. В действительности поверхности крупногабаритных астрономических зеркал всегда имеют местные погрешности. На открытых участках зеркал происходит «усреднение» погрешностей поверхности, а о закрытых участках всякая информация отсутствует. Поэтому принципиальный недостаток метода Гартмана заключается в том, что он «усредняет» погрешности поверхности на открытых участках зеркал и с большей или меньшей степенью вероятности «предполагает» форму поверхности зеркал на участках, закрытых диафрагмой. В связи с этим метод Гартмана явно уступает интерференционному методу, дающему полную информацию о состоянии всей контролируемой поверхности в реальном времени. Поэтому метод Гартмана наиболее рационально использовать в обсерватории, где применение интерференционного метода встречает большие трудности.

ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

1. ТИПОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Оптическим прибором называют прибор, основная функция которого выполняется с помощью оптической системы. Оптические системы образуют либо самостоятельный прибор, например телескоп, зрительная труба, микроскоп, фотоаппарат, либо являются составной частью более сложных приборов и комплексов. Среди многообразия оптических систем, применяемых в оптических приборах и комплексах, можно выделить три основные группы типовых оптических систем: телескопическую систему, оптическую систему микроскопа и оптическую систему объектива.

Телескопическая система служит для наблюдения удаленных предметов. Оптическая сила телескопической системы всегда равна нулю.

Оптическая система микроскопа предназначена для создания увеличенного изображения близких предметов, т. е. рассмотрения предметов с конечного расстояния.

Оптическая система объектива служит для образования изображения плоских или протяженных предметов, расположенных в «бесконечности» или на конечном расстоянии, на поверхности приемника изображения, в качестве которого может быть использован фотографический слой, фотокатод электронно-лучевой трубки или электронно-оптического преобразователя, фоточувствительный слой приемника и т. п.

Основные характеристики перечисленных оптических систем можно разделить на характеристики геометрические, светотехнические и оценки качества изображения.

К геометрическим характеристикам относятся фокусное расстояние f' , определяющее масштаб изображения, фокальные отрезки s_f и s'_f , рабочее расстояние s_r (для объективов); увеличение Γ , поле (угловое 2ω или линейное $2y$), диаметры входного D и выходного D' зрачков.

К светотехническим характеристикам относятся коэффициент светопропускания τ , коэффициент светорассеяния r , коэффициент виньетирования K_Q (K_ω), а для объективов — распределение освещенности E_ω по полю и цветопередача.

К характеристикам оценки качества изображения следует отнести функцию рассеяния, пограничную кривую, оптическую передаточную функцию, а также остаточные aberrации и разрешающую способность.

Все указанные в первых двух группах характеристики в большей или меньшей степени связаны с качеством изображения, создаваемого оптическим прибором. Например, относительное отверстие (отношение диаметра D входного зрачка к фокусному расстоянию f') оптической системы определяет освещенность изображения. С увеличением относительного отверстия возрастают значения аберраций объектива. Светорассеяние снижает контраст изображения. Падение освещенности на краях поля фотографического объектива приводит к тому, что фотографическое изображение, создаваемое широкоугольными объективами, оказывается «недодержанным» на краю снимка по сравнению с его центральной частью.

Указанные основные характеристики оптических систем измеряются на стадии исследования опытных образцов, когда проверяется соответствие характеристик изготовленного опытного образца характеристикам расчетным. В процессе серийного производства проверяются не все характеристики, а только те из них, которые определены техническими условиями на изготовление оптических приборов. При этом выбор контролируемых параметров и характеристик зависит от области применения приборов. Контроль некоторых параметров и характеристик можно выполнять в процессе изготовления элементов оптической системы, а также при осуществлении технологических операций.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ОБЪЕКТИВОВ И ЛИНЗ

Передние f и задние f' фокусные расстояния являются основными характеристиками объективов и линз. Как правило, измеряют заднее фокусное расстояние f' , которое будем называть просто фокусным расстоянием. Фокусное расстояние любой оптической системы — это расстояние между ее задней главной и задней фокальной плоскостями, или расстояние от задней главной точки до заднего фокуса оптической системы (рис. 93).

Положение задней главной плоскости или задней главной точки непосредственно установить с достаточной точностью сложно, поэтому методы измерения фокусного расстояния в основном являются косвенными.

Для измерения фокусного расстояния f' оптических систем ис-

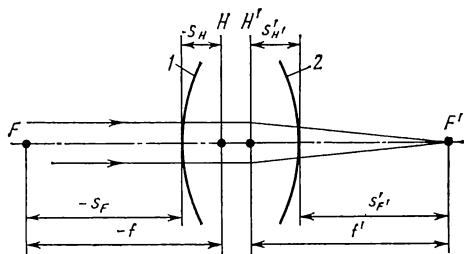


Рис. 93. Главные плоскости оптической системы

пользуют оптические скамьи и специальные приборы — фокометры. Методы измерения, разработанные на основе законов геометрической оптики, позволяют с достаточной точностью измерить f' без нахождения положения задней главной плоскости или задней главной точки. Наибольшее распространение получил метод увеличения.

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ

Этот метод основан на определении линейного увеличения и вычислении f' .

Измерения линейного увеличения выполняют по двум схемам. В первой схеме (рис. 94, а) тест-объект 3, расположенный в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора и освещенный с помощью источника света 1 через конденсор 2, проецируется испытуемым объективом 5 в его фокальную плоскость. Изображение тест-объекта (сетка с вертикальными штрихами) рассматривают с помощью микроскопа 6 и измеряют расстояние (y') между выбранными штрихами сетки окуляр-микрометром, установленным на микроскопе. Апертурный угол микроскопа 6 должен быть не меньше апертурного угла испытуемого объектива.

Во второй схеме (рис. 94, б) тест-объект 3, освещенный источником 1 через конденсор 2, расположен в фокальной плоскости испытуемого объектива 4. Его изображение рассматривают и измеряют с помощью зрительной трубы 5 с окуляр-микрометром. При этом расстояние y между штрихами в плоскости предмета, фокусное расстояние f'_k объектива коллиматора в первой схеме и фокусное расстояние f'_r объектива зрительной трубы во второй схеме должны быть известны с предельной точностью. Для первой схемы

$$f' = f'_k y' / y, \quad (71)$$

для второй схемы

$$f' = f'_r y / y'. \quad (72)$$

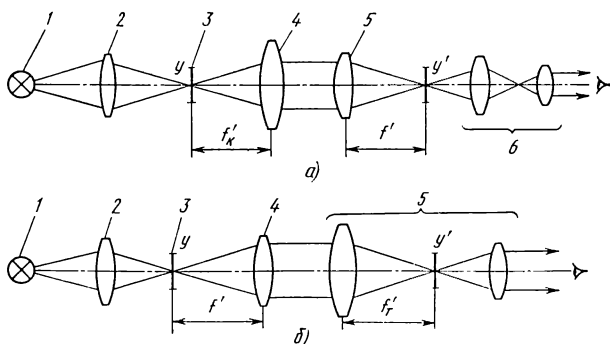


Рис. 94. Схемы устройства для измерения f' методом увеличения в ходе лучей:

а — прямом; б — обратном

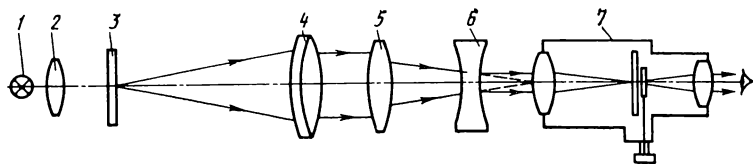


Рис. 95. Схема измерения фокусного расстояния отрицательных линз

Для определения погрешности метода найдем относительную погрешность определения фокусного расстояния, для чего прологарифмируем и продифференцируем выражения (71):

$$\Delta f'/f' = \Delta f'_k/f'_k + \Delta y/y + \Delta y'/y'.$$

С учетом предельных погрешностей измерения f'_k и y

$$\Delta f'_k/f'_k = 0,2\% \quad \text{и} \quad \Delta y/y = 0,02\%.$$

С учетом инструментальных погрешностей окуляр-микрометра, погрешностей шкалы, наведения перекрестия окуляр-микрометра на изображение штрихов сетки и других $\Delta y'/y'$ составит 0,1 ... 0,3 % измеряемой величины. Тогда относительная погрешность при определении фокусного расстояния методом увеличения будет равна 0,3 ... 0,6 %.

Методом увеличения можно определить фокусное расстояние отрицательных линз и оптических систем. Для этого отрицательную систему или линзу 6 (рис. 95) необходимо дополнить положительной системой 5 с большим фокусным расстоянием. Дополнительная положительная система 5 и измеряемая отрицательная 6 в совокупности составляют трубку Галилея. Источник света 1 с помощью конденсора 2 освещает тест-объект 3 (шкала с вертикальными штрихами), по которому определяют размер предмета y . Предмет, расположенный в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора, изображается трубкой Галилея в фокальной плоскости объектива зрительной трубы 7. Изображение предмета y' измеряют с помощью окуляр-микрометра зрительной трубы.

Для определения фокусного расстояния отрицательной системы выполняют два измерения размера изображения предмета: y'' — с трубкой Галилея и y' — без трубки Галилея. Тогда увеличение трубки

$$\Gamma_T = y'/y''.$$

В то же время увеличение $\Gamma_T = f'_n/f'$, где f'_n — фокусное расстояние дополнительной положительной системы; f' — измеряемое фокусное расстояние отрицательной системы. Отсюда следует, что $f' = y''f'_n/y'$, где y' и f'_n — постоянные установки, которые могут быть измерены с минимальной погрешностью. Погрешность измерений отрицательных систем достигает 0,6 %.

С большей точностью фокусное расстояние можно измерить методами Аббе и угловых измерений.

МЕТОД АББЕ

Метод основан на определении увеличения для нескольких (не менее двух) положений предмета, расположенного перпендикулярно к оптической оси испытуемой системы. Расстояние между положениями предмета должно быть известно.

Принцип измерения фокусного расстояния этим методом заключается в следующем (рис. 96, а). Пусть y_1 и y_2 — два предмета, расположенные на расстояниях z_1 и z_2 от переднего фокуса испытуемой системы, а y'_1 и y'_2 — их изображения. Тогда

$$z_1 = f' y_1 / y'_1 = f' \gamma_1,$$

так как $\gamma_1 = 1/\beta_1 = y_1 / y'_1$;

$$z_2 = f' y_2 / y'_2 = f' \gamma_2,$$

так как $\gamma_2 = 1/\beta_2 = y_2 / y'_2$.

Здесь γ_1 и γ_2 — угловое увеличение в сопряженных плоскостях.

Из приведенных соотношений получим

$$f' = \frac{z_2 - z_1}{\gamma_2 - \gamma_1} = \frac{a}{y_2 / y'_2 - y_1 / y'_1}, \quad (73)$$

где $a = z_2 - z_1$.

Измерения f' методом Аббе выполняют на инструментальном микроскопе или специальном приборе — фокометре Аббе. Изме-

рения не зависят от точности фокусировки на изображение предмета, так как схема имеет телецентрический ход лучей (после испытуемой системы главные лучи выходящих пучков идут параллельно оптической оси).

Фокометр Аббе состоит из микроскопа 1 (рис. 96, б), столика 3 для установки контролируемого объектива 2 и стеклянной шкалы 4. В приборе стеклянная шкала 4' перемещается вертикально, параллельно оптической оси испытуемой системы.

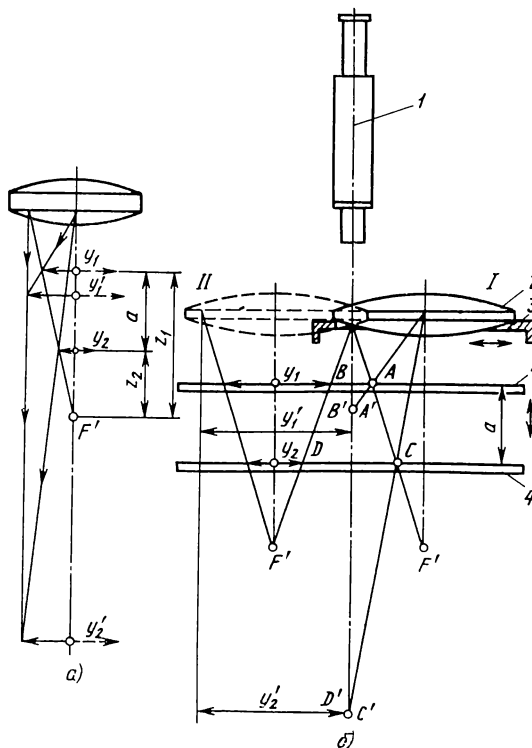


Рис. 96. Схемы измерения фокусного расстояния методом Аббе:

а — для расчета; б — для измерения

Столик с контролируемым объективом перемещается горизонтально относительно микроскопа и его положение фиксируется по горизонтальной шкале.

Перед измерениями оптическую ось микроскопа 1 совмещают с оптической осью контролируемого объектива 2. Контролируемый объектив устанавливают так, чтобы оптическая ось микроскопа проходила через середину шкалы. Для этого без контролируемого объектива рассматривают через микроскоп один из штрихов стеклянной шкалы 4, совмещая ее с предметной плоскостью микроскопа. Затем устанавливают контролируемый объектив на предметный столик, опуская шкалу до того положения, при котором рассматриваемый штрих окажется в первоначально установленном положении относительно перекрестия сетки микроскопа. Измерения осуществляют смещением столика с контролируемым объективом в одну и другую сторону от среднего положения шкалы.

Размер предмета y_1 определится разностью отсчетов по стеклянной шкале 4, а размер изображения y'_1 по шкале перемещения столика в горизонтальном направлении. Первый отсчет снимают в положении I контролируемого объектива (см. рис. 96, б), когда микроскоп сфокусирован на изображение A' штриха A , второй отсчет снимают в симметричном относительно оптической оси положении II, когда микроскоп сфокусирован на изображение B' штриха B стеклянной шкалы, расположенное в том же месте, что и A' . Значение отрезка AB обозначим q_1 , тогда размер предмета

$$y_1 = y'_1 - q_1.$$

Возвратив испытуемый объектив в положение I, смещаем стеклянную шкалу в положение 4' и фокусируем на нее микроскоп, рассматривая изображение C' штриха C . Снова сместив испытуемый объектив в положение II, наблюдаем изображение D' штриха D . Значение отрезка CD обозначим q_2 . Размер изображения y'_2 будет равен значению перемещения стола, а размер предмета $y_2 = y'_2 - q_2$. По формуле (73) вычисляют фокусное расстояние контролируемого объектива

$$f' = \frac{a}{(y'_2 - q_2)/y'_2 - (y'_1 - q_1)/y'_1} = \frac{a}{q_1/y'_1 - q_2/y'_2}.$$

Если при смещении стеклянной шкалы в обоих положениях контролируемый объектив перемещать на одно и то же расстояние, (как показано на рис. 96, а), то $y'_1 = y'_2 = y'$, и тогда

$$f' = y' a / (q_1 - q_2). \quad (74)$$

По формуле (74) находят фокусное расстояние для определенной зоны контролируемого объектива. Повторив аналогичные измерения для разных зон, находят зависимость f' от зоны. Построив график зависимости и экстраполируя его до $y' = 0$, можно определить фокусное расстояние для параксиальной области.

Для определения погрешности метода прологарифмируем и продифференцируем формулу (74):

$$\Delta f'/f' = \Delta y'/y' + \Delta a/a + \\ + \Delta q_1/(q_1 - q_2) + \Delta q_2/(q_1 - q_2).$$

Погрешность при определении f' этим методом в основном возникает вследствие погрешности измерения изображения y' , так как значение перемещения a стеклянной шкалы и расстояние между штрихами можно измерить с высокой точностью.

Погрешность измерения y' зависит от качества изображения контролируемого объектива, размера изображения и инструментальных погрешностей отсчетного устройства.

Общая погрешность измерения фокусного расстояния методом Аббе составляет 0,2 ... 0,5 %. Фокусное расстояние оптических систем с большими диаметрами зрачка входа может быть измерено со значительно меньшей погрешностью. Этим методом измеряют фокусные расстояния объективов коллиматоров, имеющих большие диаметры зрачков входа.

МЕТОД УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Метод основан на измерении угла α , под которым виден отрезок шкалы 1 (рис. 97), расположенный в фокальной плоскости контролируемого объектива 2. Измерения выполняют на гониометре, поэтому метод также называют гониометрическим.

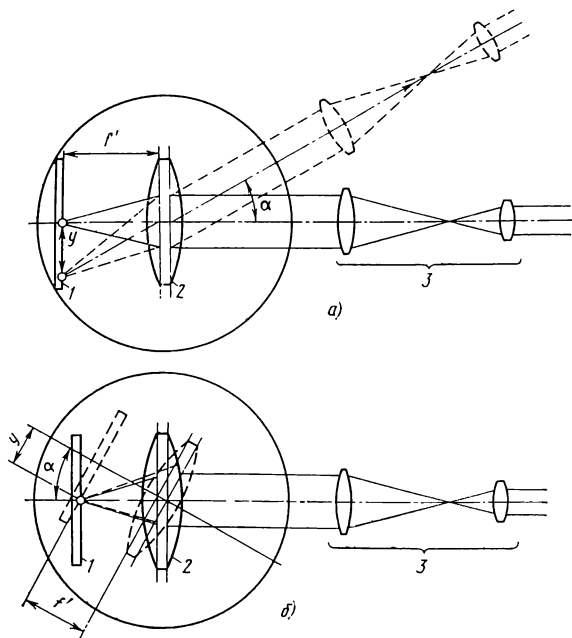


Рис. 97. Схемы устройства для измерения фокусного расстояния методом угловых измерений:

а — с помощью вращающейся зрительной трубы; *б* — с помощью вращающегося столика

Измерения фокусных расстояний этим методом осуществляются с высокой точностью. Метод пригоден для измерения фокусных расстояний только положительных систем.

Измерив угол α , под которым виден отрезок y шкалы 1 из главной точки объектива или линзы, вычисляют фокусное расстояние по формуле

$$f' = y \operatorname{ctg} \alpha. \quad (75)$$

Линейный размер y отрезка шкалы известен с высокой точностью. Угол измеряют двумя способами.

При первом способе измерения (рис. 97, а) угловой размер отрезка y , т. е. угол α определяется с помощью вращающейся зрительной трубы 3 гониометра и дополнительной шкалы 1, установленной в фокальной плоскости контролируемого объектива 2. Контролируемый объектив устанавливают на столик гониометра так, чтобы плоскость зрачка входа объектива проходила через ось вращения зрительной трубы. При измерениях объектив 2 и стеклянная шкала 1 неподвижны. Визируя зрительную трубу на крайние точки изображения выбранного интервала y шкалы 1 и совмещая их с перекрестием сетки окуляра, снимают отсчеты по лимбу гониометра. Разность отсчетов даст измеряемый угол α .

При втором способе измерения (рис. 97, б) контролируемый объектив 2 и стеклянная шкала 1 жестко связаны с вращающимся столиком, а зрительная труба 3 неподвижна. Ось вращения столика гониометра, так же как и в первом способе, проходит через плоскость входного зрачка объектива 2. Наблюдая в зрительную трубу выбранный отрезок, наводят перекрестия ее на края отрезка вращением столика. По разности отсчетов определяют угол α .

В обоих способах, рассмотренных выше, измерения выполняют для различных отрезков y и, вычислив значения f' для каждого y , определяют среднее значение фокусного расстояния.

Для определения погрешности метода находят относительную погрешность, логарифмируя и дифференцируя формулу (75):

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta \alpha}{\operatorname{tg} \alpha \cos^2 \alpha} = \frac{\Delta y}{y} + \frac{2 \Delta \alpha}{\sin 2\alpha}.$$

На точность измерения гониометрическим методом, кроме погрешностей измерения Δy и $\Delta \alpha$, влияет погрешность установки стеклянной шкалы в фокальной плоскости испытуемого объектива.

Погрешность установки шкалы выражается в миллиметрах:

$$\Delta f_y = \Delta_z \left(\frac{f'}{f_T} \right)^2 = \frac{0,2 f'}{250 D^2},$$

где Δ_z — погрешность наведения зрительной трубы, $\Delta_z = 0,2/\sigma_A^2$, мкм; f_T — фокусное расстояние объектива зрительной трубы; σ_A — действующий апертурный угол объектива зрительной трубы, $\sigma_A = D/(2f_T)$; D — диаметр входного зрачка контро-

лируемого объектива зрительной трубы, если он меньше диаметра входного зрачка объектива. Тогда общая погрешность определения фокусного расстояния

$$\Delta f'/f' = \Delta y/y + 2\Delta\alpha/(\sin 2\alpha) + 0,2f'/(250D^2).$$

Пример. Пусть $f' = 100$ мм, $y = 10$ мм, $\Delta y = 0,005$ мм; $D = 20$ мм; $\Delta\alpha = 2'' = 10^{-5}$; $\alpha = 0,1$, получим $\Delta f'/f' = 0,08$ %.

Достижимая на практике точность зависит от качества изображения контролируемого объектива и всегда несколько ниже расчетной.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ФОКАЛЬНЫХ ОТРЕЗКОВ

Расстояние $s'_{F'}$ от вершины задней поверхности оптической системы до заднего фокуса называют задним фокальным отрезком (см. рис. 93). Аналогично определяют передний фокальный отрезок s_F .

Фокальные отрезки измеряют для нахождения положения главных плоскостей оптической системы: $s_{H'} = f' - s'_{F'}$; $s_H = f - s_F$ и для контроля при изготовлении отдельных и склеенных линз.

Фокальные отрезки положительных оптических систем и линз измеряют на оптических скамьях с помощью микроскопа (рис. 98).

При измерении фокальных отрезков микроскоп 6 фокусируют на вершину последней поверхности контролируемого объектива или линзы 5 и снимают отсчет по шкале 7 перемещений микроскопа. Затем фокусируют микроскоп на изображение тест-объекта 3, расположенного в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора и освещенного источником света 1 через конденсор 2, снимают второй отсчет. Разность отсчетов соответствует фокальному отрезку $s'_{F'}$. Иногда перед объективом коллиматора устанавливают диафрагму 8 для ограничения пучка лучей.

В качестве тест-объекта используют миру или сетку с любым рисунком. Фокусировку на поверхность линзы выполняют по имеющимся царапинам или специально наносят на поверхность

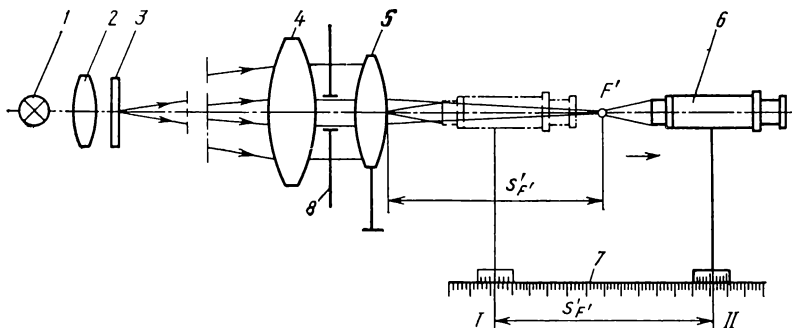


Рис. 98. Схема устройства для измерения фокальных отрезков оптических систем

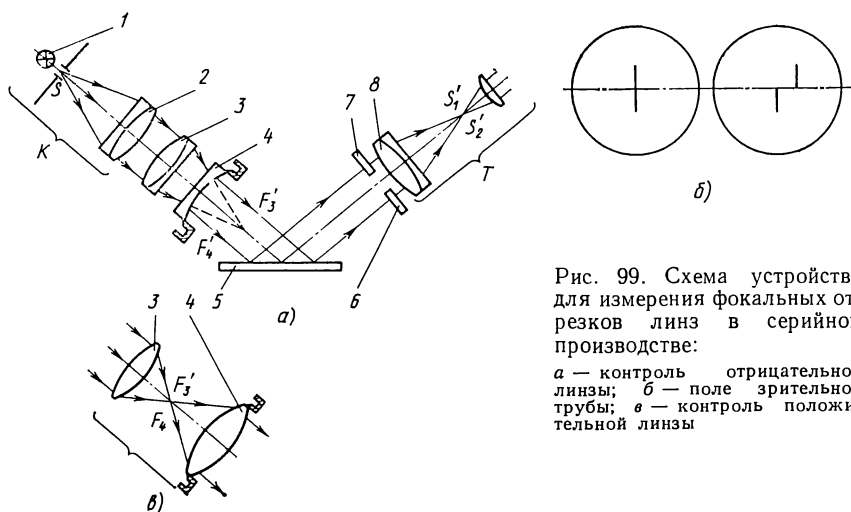


Рис. 99. Схема устройства для измерения фокальных отрезков линз в серийном производстве:

a — контроль отрицательной линзы; *б* — поле зрительной трубы; *в* — контроль положительной линзы

линзы несколько пылинок мела или пудры и рассматривают изображение поверхности с помощью микроскопа с увеличением $20 \dots 30\times$. Числовая апертура микроскопа должна соответствовать относительному отверстию объектива.

Точность измерения фокальных отрезков положительных систем и линз зависит от чувствительности продольной наводки, от погрешности установки коллиматора на бесконечность, инструментальной погрешности и погрешности шкалы перемещений микроскопа. Погрешность определения s_F и s'_F на практике не превышает 1 %, что вполне достаточно для сравнения измеренных и расчетных данных.

При измерении отрицательных систем микроскоп заменяют зрительной трубой с положительной насадкой или объектив микроскопа — длиннофокусной положительной линзой. После наведения на поверхность наблюдательный прибор следует перемещать в сторону коллиматора для получения изображения тест-объекта. Точность определения s_F и s'_F отрицательных систем и линз ниже точности измерения положительных и уменьшается с увеличением абсолютных значений фокальных отрезков.

Для контроля фокальных отрезков положительных и отрицательных линз Ю. В. Коломийцовым предложена схема установки для условий серийного производства. Устройство (рис. 99, *a*) состоит из коллиматора *K*, дополнительного объектива 3, клиньев 6, 7 и зрительной трубы *T*.

В фокальной плоскости объектива 2 коллиматора расположена светящаяся щель *S*, освещенная лампой накаливания 1. Щель проецируется дополнительным объективом 3 и контролируемой линзой 4 в фокальную плоскость объектива 8 зрительной трубы. Плоское зеркало 5 установлено для сокращения габаритных размеров установки. Перед объективом зрительной трубы установ-

лены два клина 6 и 7, которые разделяют изображение щели на две части S'_1 и S'_2 по высоте. Обе части изображения щели будут совмещены (рис. 99, б), если передний фокус F_4 линзы 4 совмещен с задним фокусом F_3 дополнительного объектива 3. Совмещение фокусов осуществляется перемещением дополнительного объектива в ту или другую сторону вдоль оптической оси до тех пор, пока обе части изображения щели не совпадут. Дополнительный объектив является сменным и рассчитывается для каждого типа испытываемых линз в целях компенсаций их сферической и хроматической аберраций.

При контроле отрицательной линзы (см. рис. 99, а) линза 4 и дополнительный объектив 3 образуют галилеевскую оптическую систему, при контроле положительной (рис. 99, в) — кеплеровскую оптическую систему.

Контроль фокального отрезка испытываемой линзы выполняют по эталонной линзе. Установив эталонную линзу, добиваются совмещения обеих частей изображения щели, т. е. совмещают фокусы дополнительного объектива и эталонной линзы с известным фокальным отрезком. Затем устанавливают контролируемую линзу. При расхождении изображений щели (см. рис. 99, б) добиваются их совмещения перемещением дополнительного объектива. Измеренное по шкале перемещение дополнительного объектива равно значению отклонения фокального отрезка контролируемой линзы от эталонной. Погрешность измерения, установленная опытным путем, при $s_F = 25$ мм составила 0,04 %.

4. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧИХ РАССТОЯНИЙ

Расстояние от опорного торца оправы оптической системы до плоскости наилучшего изображения называют рабочим расстоянием L_p . Рабочее расстояние измеряют в целях фиксирования наилучшей плоскости изображения относительно опорного торца для последующего совмещения ее с плоскостью приемника изображения, а также для обеспечения взаимозаменяемости объективов. Рабочее расстояние можно изменять подрезкой опорного торца оправы.

Плоскостью наилучшего изображения у реальных объективов с остаточными аберрациями принято считать плоскость, в которой освещенность в центре изображения светящейся бесконечно удаленной точки имеет наибольшее значение. Эта плоскость не совпадает с фокальной плоскостью изображения бесконечно удаленного предмета идеальной оптической системы, а также с плоскостью наименьшего сечения геометрического пучка лучей.

Таким образом, у объективов с большим полем различают плоскость максимальной освещенности изображения или плоскость максимального контраста (она же является и плоскостью максимальной резкости), плоскость максимального разрешения и фокальную плоскость.

Измерение рабочего расстояния объективов сводится к определению положения плоскости наилучшего изображения относительно опорного торца корпуса объектива.

Выбор плоскости наилучшего изображения (далее — просто плоскость изображения) зависит от назначения объектива. Для большинства оптических систем плоскостью изображения считают плоскость максимального контраста (плоскость наибольшей резкости).

При определении плоскости изображения необходимо учитывать спектральный состав источника света. Положение плоскости изображения зависит от спектральной и интегральной чувствительности приемника. Поэтому одним из условий нахождения положения плоскости изображения для реальных объективов является идентичность приемника, используемого для измерения рабочего расстояния, приемнику, применяемому в комбинации с исследуемым объективом, либо возможность установления соответствия приемников по спектральной и интегральной чувствительности с помощью светофильтров.

В зависимости от приемника, применяемого для определения плоскости изображения, и способа фиксации плоскости изображения различают визуальный, фотографический, интерференционный и фотоэлектрический методы измерения.

ВИЗУАЛЬНЫЙ МЕТОД

Этот метод измерения основан на определении положения плоскости изображения с помощью наблюдательного микроскопа. Измерения по этому методу выполняются на вертикальном коллиматоре (рис. 100) или оптической скамье. При измерении на коллиматоре контролируемый объектив 3 устанавливают опорным торцом на объективодержатель 4. Рассматривая с помощью наблюдательного микроскопа 6 изображение тест-объекта 1, расположенного в фокальной плоскости объектива 2 коллиматора, добиваются резкого его изображения перемещением объективодержателя относительно шкалы 8. С помощью измерительного микроскопа 7, жестко связанного с объективодержателем 4, снимают по шкале 8 отсчет, определяющий положение плоскости

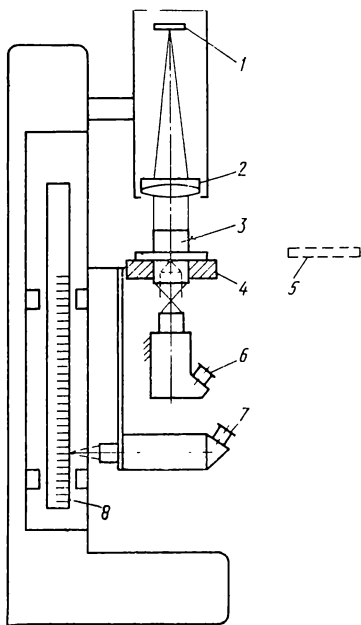


Рис. 100. Схема устройства для измерения рабочего расстояния визуальным методом

изображения. Затем снимают контролируемый объектив 3 и на торец объективодержателя устанавливают стеклянную пластину 5. Для обеспечения наведения на резкость опорной плоскости торца пластины, соприкасающийся с торцом объективодержателя, должен иметь либо царапины, либо какое-нибудь покрытие (мел, пудра). Перемещением объективодержателя с пластиной, наблюдая в микроскоп, добиваются резкого изображения нижней плоскости пластины 5, при этом по измерительному микроскопу снимают второй отсчет, фиксирующий опорный торец контролируемого объектива. Разность отсчетов дает искомое рабочее расстояние контролируемого объектива. В качестве тест-объекта 1 может быть использована мира, круглое отверстие или специальный растр. Для обеспечения необходимой точности измерения диаметр объектива коллиматора должен быть больше диаметра контролируемого объектива, фокусное расстояние объектива коллиматора в 3—5 раз больше фокусного расстояния контролируемого объектива и числовая апертура наблюдательного микроскопа не меньше апертуры контролируемого объектива.

Погрешность измерения определяется погрешностями фокусировки изображения тест-объекта в плоскости изображения контролируемого объектива, установки тест-объекта в фокальной плоскости объектива коллиматора, нанесения штрихов шкалы и перемещения объективодержателя. Кроме того, точность измерения зависит от опыта оператора. Основными недостатками визуального метода являются: субъективность оценки наилучшей резкости и контраста при определении плоскости изображения, трудоемкость, утомляемость оператора и необходимость высокой квалификации оператора. Несмотря на указанные недостатки, визуальный метод пока широко применяют при серийном производстве объективов.

ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Этот метод измерения рабочих расстояний объективов основан на фиксировании положения плоскости изображения по наилучшей резкости на фотоэмульсионном слое.

Положение плоскости изображения по фотографическому методу определяют с помощью специальной фотокамеры 4 (рис. 101),

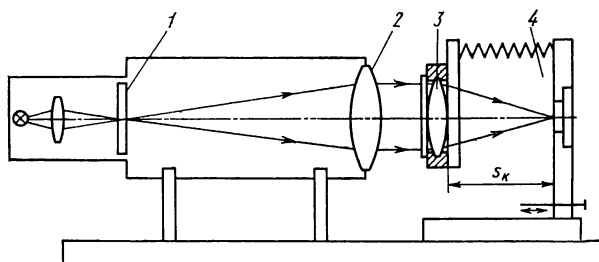


Рис. 101. Схема устройства для измерения рабочего расстояния фотографическим методом

в которой устанавливают контролируемый объектив 3. Расстояние s_k от опорного торца камеры до плоскости фотослоя известно с высокой точностью. Это расстояние можно изменять через определенные значения вдоль оптической оси, как правило, через 0,02 мм. При определении рабочего расстояния объективов фотографируют либо глубинные миры, сдвинутые одна относительно другой в ту и другую сторону от номинала рабочего расстояния, указанного в технических условиях настолько, что изображение каждой оказывается смещенным на 0,02 мм, при этом положение фотослоя остается неподвижным, либо миры, расположенные в одной плоскости, тогда смещается плоскость фотослоя. Смещение плоскости фотослоя осуществляется при перемещении кассеты в камере через 0,02 мм вдоль оптической оси от места предварительной установки камеры, при этом выполняют несколько снимков.

При измерении рабочих расстояний у длиннофокусных объективов камеру устанавливают перед коллиматором, в фокальной плоскости объектива 2 которого расположен тест-объект 1 (мира, растр). Экспонированную пленку проявляют и расшифровывают с помощью микроскопа. Плоскость изображения определяют по более резкому и контрастному снимку. Рабочее расстояние, измеренное таким способом, называют фотографическим рабочим расстоянием. Значения фотографического рабочего расстояния и рабочего расстояния, измеренного визуальным методом, как правило, отличаются одно от другого вследствие различных спектральных характеристик пленки и глаза. Поэтому в случае определения фотографического рабочего расстояния визуальным методом вводят поправку, которую находят опытным путем для каждого типа объектива. Например, разница между фотографическим и визуальным рабочими расстояниями для сменных объективов зеркальных фотоаппаратов «Зенит» колеблется в пределах 0,02 ... 0,06 мм. Для приведения в соответствии визуального рабочего расстояния с фотографическим потребовался бы фильтр, выделяющий красную область спектра при визуальном методе измерения, так как максимум спектральной чувствительности фотоэмульсионного слоя сдвинут в красную область спектра. Но при этом следует учитывать, что при использовании красного фильтра для визуальных измерений глаз оператора утомляется сильнее, чем при использовании зеленого фильтра, применяемого, как правило, в визуальных измерительных приборах.

Субъективность визуального метода присуща и фотографическому методу, так как расшифровка пленки при определении положения плоскости изображения осуществляется визуально. Фотографический метод малопроизводителен и неэкономичен. Основное преимущество фотографического метода заключается в том, что он позволяет определить плоскость наилучшего изображения для фотографических объективов в рабочих условиях, т. е. в соответствии с их назначением.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД

Ю. В. Коломийцов разработал интерференционный метод измерения рабочих расстояний объективов на основе интерферометра Тваймана—Грина. Интерферометр для измерения рабочих расстояний объективов (рис. 102) состоит из источника света 1, освещающего точечную диафрагму 2, расположенную в фокальной плоскости коллиматорного объектива 3, плоского зеркала 4, разделительной полупрозрачной пластины 5, объектива 6, сферического зеркала 7, эталонного объектива 8, сферического зеркала 9, объектива 10 и окуляра 11. После отражения от плоского зеркала 4 одна часть параллельного пучка, вышедшего из коллиматора, проходит через пластину 5 в эталонный объектив 8, другая, отразившись от нее, — в объектив 6. Сферические зеркала 7 и 9 установлены так, что задние фокусы F' объективов 6 и 8 совпадают с центрами кривизны C соответственно зеркал 7 и 9. Юстировку выполняют с помощью окуляра 11.

Разделенные параллельные пучки, пройдя объективы 6 и 8, отразятся от зеркал 7 и 9 и выйдут из объективов также парал-

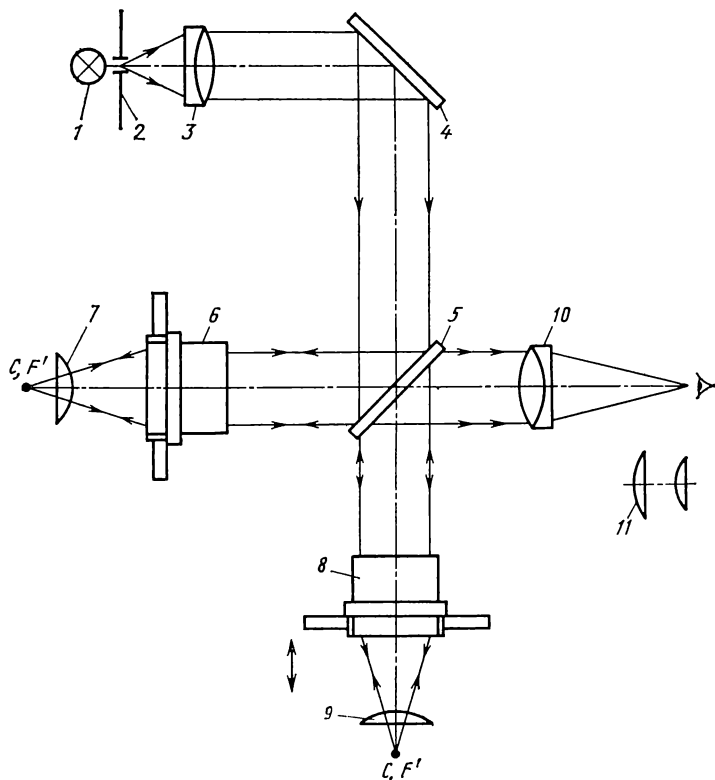
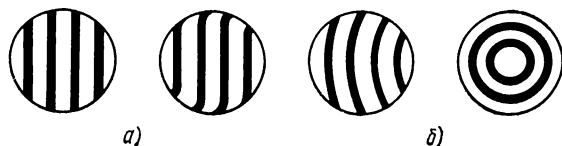


Рис. 102. Схема интерферометра для измерения рабочих расстояний объективов

Рис. 103. Интерференционные картины при измерении рабочих расстояний объективов



лельными, так как задние фокусы объективов совпадают с центрами кривизны зеркал. Выходящий из объектива 6 пучок, пройдя разделительную пластину, попадает в объектив 10 и затем в глаз наблюдателя. Выходящий из объектива 8 пучок отразится от разделительной пластины и через объектив 10 попадет также в глаз наблюдателя. Так как оба пучка исходят из одного источника, они когерентны и будут интерферировать один с другим. Наблюдатель увидит светлое или темное поле в зависимости от разности хода между пучками. Если сместить центры кривизны одного из зеркал (7 или 9) перпендикулярно к оси падающего пучка на небольшое расстояние, то появится интерференционная картина в виде полос, чуть искривленных по краям (рис. 103). Это произойдет вследствие того, что объективы 6 и 8 не могут быть вполне одинаковыми по aberrациям.

Принцип измерения основан на следующем. Если объектив 8 (см. рис. 102) перемещать вдоль оптической оси вверх или вниз от ранее установленного положения, то выходящий из него пучок не будет параллельным и интерференционная картина изменится, полосы перейдут в дуги, а при большом смещении — в кольца (рис. 103, б). Установив эталонный объектив 8 (см. рис. 102) и выполнив юстировку его по интерференционным полосам (см. рис. 103, а), заменяют его контролируемым объективом. Если рабочее расстояние обоих объективов одинаково, то картина не изменится: если разное, то полосы перейдут в дуги или окружности. Перемещая контролируемый объектив вдоль оптической оси, получают интерференционную картину как при эталонном объективе. По значению перемещения определяют разницу между рабочими расстояниями эталонного и контролируемого объективов.

Погрешность измерения интерференционным методом зависит от точности совмещения центров кривизны сферических зеркал и задних фокусов объективов при юстировке и измерении, а также от качества коррекции объективов. По экспериментальным данным измерения можно произвести с погрешностью 0,01 ... 0,02 мм.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Метод основан на измерении максимальной освещенности, соответствующей плоскости наилучшего изображения, с помощью фотоприемника, преобразующего световой поток, проходящий через контролируемый объектив, в электрические сигналы.

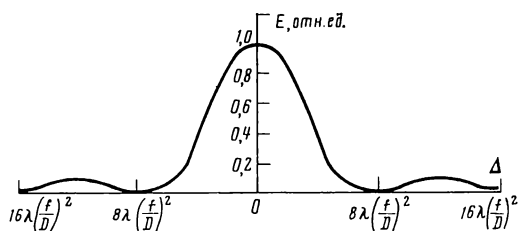


Рис. 104. Распределение освещенности вдоль оптической оси при изображении светящейся точки

Фотоэлектрический метод измерения рабочих расстояний по сравнению с рассмотренными выше является более точным, объективным и производительным, позволяет автоматизировать процесс измерения и определять рабочее расстояние оптических систем для невидимой области спектра.

Характер зависимости освещенности E в гомоцентрическом пучке лучей от расфокусировки Δ согласно формуле освещенности в изображении светящейся точки на оптической оси для безаберрационного объектива показан на рис. 104.

Максимум освещенности изображения бесконечно удаленной точки на оси находится в фокусе, затем с удалением от фокуса освещенность быстро падает.

Изменение освещенности вблизи плоскости изображения происходит медленно. Поэтому измерения для повышения чувствительности метода выполняют не в плоскости, соответствующей максимальному сигналу, а по двум плоскостям с одинаковой освещенностью.

Разработан ряд способов определения плоскости изображения. По принципу выделения сигнала различают три способа: совмещения, сканирующего анализатора и максимальной модуляции.

Способ совмещения. Способ заключается в совмещении изображения предметного тест-объекта с таким же тестом в плоскости наилучшего изображения. В зависимости от рисунка теста на фотоприемник попадает максимум или минимум света при оптимальной фокусировке.

Схема устройства для определения плоскости изображения показана на рис. 105, а. В качестве предметного 4 и приемного 7 тестов, как правило, используют радиальную миру, так как она нечувствительна к изменению масштаба. Схема состоит из

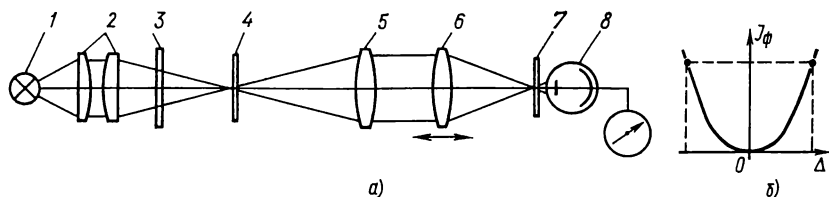


Рис. 105. Устройство для определения плоскости изображения способом совмещения:

а — схема; б — график зависимости фототока от расфокусировки

осветителя, включающего источник света 1, конденсор 2 и светофильтр 3; коллиматора, в фокальной плоскости объектива 5 которого помещен предметный тест 4; контролируемого объектива 6, перемещения которого отсчитываются по шкале; приемно-измерительного устройства, состоящего из приемного теста 7, фотоприемника 8 и регистрирующего прибора.

Перед измерениями визуально с помощью микроскопа совмещают рисунок приемного теста с изображением предметного теста. Установив фотоприемник с регистрирующим прибором, перемещают контролируемый объектив 6 вдоль оптической оси относительно приемного теста. Снимают отсчет по шкале перемещений, зафиксировав положение плоскости изображения по максимальному (если световой поток проходит через приемный тест) или минимальному (если световой поток перекрыт приемным тестом) фототоку на регистрирующем приборе.

Фиксирование плоскости изображения можно выполнять по двум отсчетам одинаковых сигналов по ту и другую сторону от плоскости изображения. Такое определение плоскости изображения увеличивает точность ее фиксирования, так как крутизна характеристики $I_{\Phi}(\Delta)$ в этих точках больше, чем в точке, соответствующей максимальному значению фототока (рис. 105, б). Поэтому для увеличения точности измерений выбирают точки кривой зависимости $I_{\Phi}(\Delta)$ с одинаковыми значениями фототока в местах наиболее крутого подъема. При этом точки должны находиться на одинаковом расстоянии от плоскости изображения. Погрешность определения плоскости изображения по двум значениям одинаковых сигналов равна $\pm 0,5$ мкм, если расстояние между плоскостями не больше 0,15 мм.

В качестве предметных и приемных тест-объектов могут быть любые фигурные диафрагмы, штриховые и радиальные растры, радиальные миры.

Способ сканирующего анализатора. Способ основан на получении максимального сигнала при сканировании изображения предметного тест-объекта анализатором. Предметными тестами могут быть штриховые или радиальные растры, анализаторами — соответственно щель или точечная диафрагма.

Способ сканирующего анализатора, так же как и способ совмещения, может быть реализован с помощью устройств, работающих на постоянном или переменном токе. В установках, предназначенных для способа совмещения, при получении переменного тока необходимо устанавливать специальный модулятор для модуляции светового потока, а в установках, предназначенных для способа сканирующего анализатора, модулятором может быть сам растр.

Схема устройства для определения плоскости изображения способом сканирующего анализатора показана на рис. 106. Прямоугольная решетка 3, освещаемая источником света 1 через конденсор 2, расположена в фокальной плоскости объектива 4

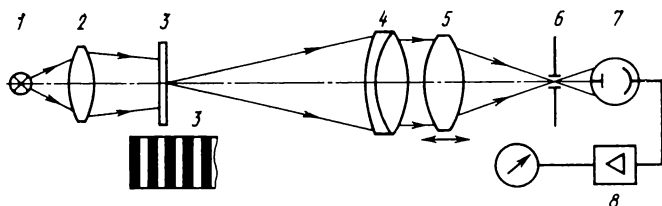


Рис. 106. Схема устройства для определения плоскости изображения способом сканирующего анализатора

коллиматора. Контролируемый объектив 5 проецирует изображение решетки в заднюю фокальную плоскость, в которой находится сканирующий анализатор 6 в виде щели. Световой поток, пройдя через щель 6, преобразуется в электрические сигналы фотоприемником 7, затем усиливается широкополосным усилителем 8 и регистрируется измерительным устройством. Для определения плоскости изображения анализатор или контролируемый объектив перемещают вдоль оптической оси. Положение анализатора (щели или диафрагмы) при максимальном отклонении стрелки измерительного устройства фиксирует плоскость изображения.

Способ максимальной модуляции. Способ основан на изменении глубины модуляции потока излучения при расфокусировке. Модуляция потока излучения, ограниченного круглой диафрагмой, осуществляется вращающейся радиальной мишенью или секторным растром. Определение плоскости изображения заключается в нахождении плоскости, в которой модуляция светового потока излучения, ограниченного круглой диафрагмой, будет максимальной (100 %). Это произойдет, если диаметр круглой диафрагмы равен расстоянию между секторами радиального растра (рис. 107), что используется для нахождения наиболее резкого изображения круглой диафрагмы, т. е. плоскости изображения.

При расчете схемы устройства (рис. 108) диаметр d диафрагмы 3 выбирают таким, чтобы его изображение d' вписывалось в сектор растра 6 на определенном радиусе R , фиксирующем изображение на плоскости растра.

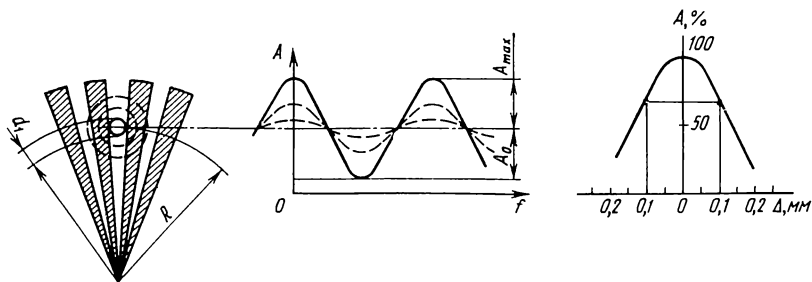


Рис. 107. Изменение сигнала при расфокусировке:

A — амплитуда сигнала; f — частота

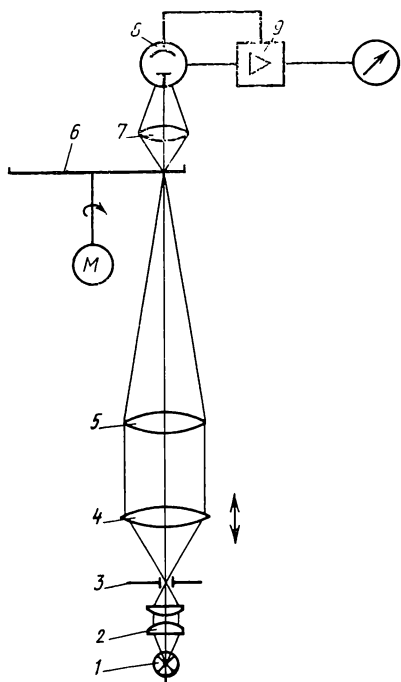


Рис. 108. Схема устройства для определения плоскости изображения способом максимальной модуляции:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — диафрагма; 4 — испытуемый объект; 5 — объектив коллиматора; 6 — модулятор; 7 — линза; 8 — фотозлемент; 9 — усилитель

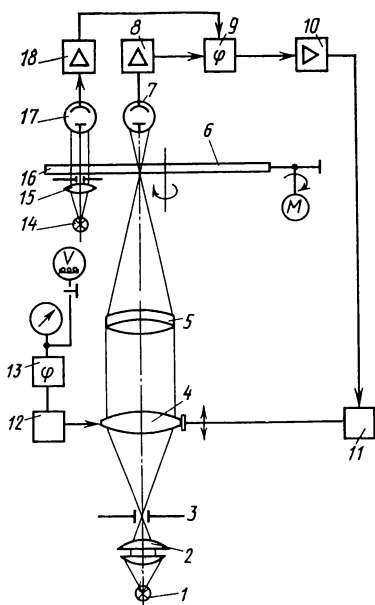


Рис. 109. Схема полуавтоматического прибора для измерения рабочих расстояний

Согласно рис. 107 зависимость между d' и R выражается формулой

$$d' = 2R \sin (\varphi/2); \quad \varphi = \pi/m,$$

где m — число пар секторов; φ — угол сектора раstra.

Тогда для схемы с прямым ходом лучей (см. рис. 108)

$$d = d' f'_k / f'_{об} = 2R \sin (\varphi/2) f'_k / f'_{об},$$

для схемы с обратным ходом лучей (рис. 109)

$$d = d' f'_{об} / f'_k = 2R \sin (\varphi/2) f'_{об} / f'_k.$$

Диаметр диафрагмы с достаточной точностью при $\varphi < 10^\circ$ можно определить по формулам: для прямого хода лучей

$$d = \frac{\pi R}{m} \frac{f'_k}{f'_{об}};$$

для обратного хода лучей

$$d = \frac{\pi R}{m} \frac{f'_{об}}{f'_k},$$

где f'_{06} — фокусное расстояние измеряемого объектива; f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора.

Практически диаметр изображения диафрагмы 3 (см. рис. 108) для увеличения чувствительности должен быть несколько больше расстояния между секторами раstra на радиусе, на который с помощью объектива 4 коллиматора и контролируемого объектива 5 проецируется изображение диафрагмы. Диафрагма 3 освещена источником света 1 через конденсор 2.

После прохождения раstra 6 световой поток фокусируется линзой 7 на фотоприемнике 8, преобразующем модулированные световые сигналы в электрические. Перемещая контролируемый объектив вдоль оптической оси, фиксируют положение плоскости изображения по максимальному показанию гальванометра.

Точность методов в основном зависит от чувствительности фотоэлектронных схем устройств и определяется изменением падающего на фотоприемник потока излучения, выраженного в делениях шкалы регистрирующего прибора, при смещении измеряемого объектива вдоль оптической оси. Чем больше это изменение при одинаковой длине перемещений, тем выше чувствительность схемы.

Чувствительность устройств можно повысить, если измерения выполнять в двух плоскостях одинакового значения сигнала, тем самым исключить влияние глубины резкости контролируемого объектива.

Это условие выполняется в схеме полуавтоматического прибора измерения рабочих расстояний (рис. 109). Схема выполнена в обратном ходе лучей, так как в этом случае сигналы можно измерять в двух плоскостях, расположенных на значительном расстоянии одна от другой, так как при расфокусировке контролируемого объектива на Δ изображение диафрагмы сместится на $\Delta' = \Delta (f'_k/f'_{06})^2$.

Основная особенность схемы заключается в модулирующем растре 6, который позволяет регистрировать разность сигналов в двух плоскостях a и b пучка лучей, образующих изображение. Схема раstra показана на рис. 110, a . В результате вращения раstra 6 (см. рис. 109) за один оборот пучок лучей модулируется в двух плоскостях и на фотоприемник 7 поступают попеременно световые сигналы a_1 и a_2 , модулированные штрихами раstra. Если сигналы одинаковые, то регистрирующий прибор (гальванометр или цифровой вольтметр) даст нулевое показание, что соответствует плоскости изображения. Если они разные, то прибор зарегистрирует отклонение от положения плоскости изображения. Сигналы a_1 и a_2 , как видно из рис. 110, b , находятся в противофазе. Противоположные фазы сигналов необходимы для автоматической установки плоскости изображения, т. е. для перемещения контролируемого объектива 4 (см. рис. 109) вверх или вниз.

Для сравнения сигналов a_1 и a_2 дополнительное устройство, состоящим из источника света 14, конденсора 15, диафрагмы 16,

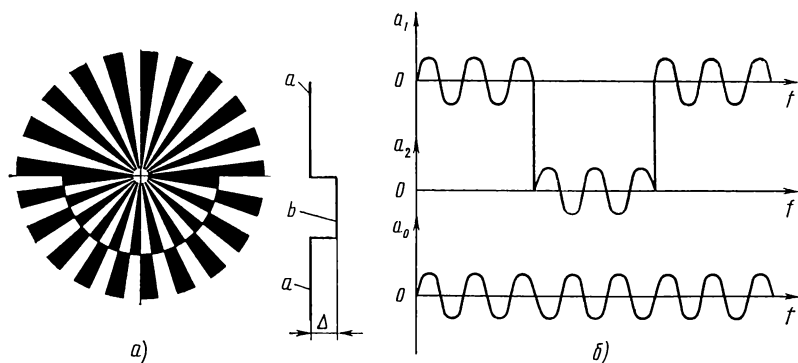


Рис. 110. Полуавтоматическое измерение рабочих расстояний:
 a — модулирующий растр; b — модулированные сигналы

фотоприемника 17 и усилителя 18, формируется опорный сигнал a_0 (см. рис. 110, б) постоянной фазы и подается на фазометр 9 (см. рис. 109). Опорный сигнал модулируется тем же растром. Фаза опорного сигнала совпадает с фазой одного из основных сигналов (a_1 — см. рис. 110, б), который формируется источником света 1, конденсором 2, диафрагмой 3, проецируемой контролируемым объективом 4 и объективом коллиматора 5 в плоскость растра. Основной сигнал, модулированный растром 6, воспринимается фотоприемником 7 и через усилитель 8 поступает в фазометр 9, где сравнивается с опорным сигналом. Усиленный сигнал с помощью усилителя 10 приводит в действие следующее устройство механизма перемещения 11 контролируемого объектива 4. Механизм перемещения объектива связан с вращающимся трансформатором 12, преобразующим угловое перемещение в напряжение, поступающее через фазометр 13 на стрелочный регистрирующий прибор или цифровой вольтметр. По цифровому вольтметру, настроенному на номинальное значение рабочего отрезка, результат измерения получают в цифрах, соответствующих измеряемому рабочему отрезку.

Погрешность метода измерения рабочего отрезка для объективов с $f' = 50$ мм составляет 0,01 %.

5. ИЗМЕРЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЙ, ПОЛЕЙ И ДИАМЕТРОВ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ЗРАЧКОВ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ИЗМЕРЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В визуальных оптических приборах видимым увеличением Γ называют отношение тангенса угла ω' , под которым наблюдают параксиальное изображение предмета, к тангенсу

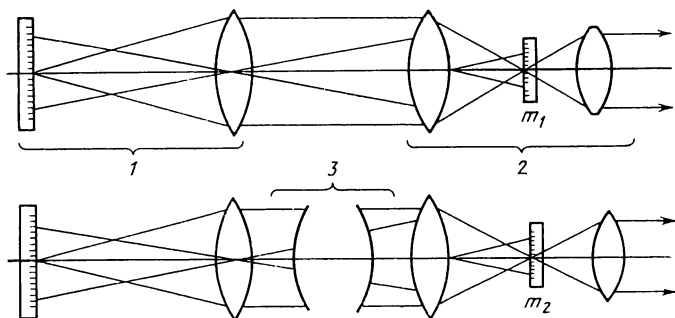


Рис. 111. Схема устройства для измерения видимого увеличения телескопической системы по угловому увеличению

угла ω , под которым тот же предмет наблюдают невооруженным глазом: $\Gamma = \tan \omega' / \tan \omega$.

Измерение видимого увеличения телескопических систем. Для телескопических систем видимое увеличение

$$\Gamma_T = -f'_{об}/f'_{ок} = D/D' = \tan \omega' / \tan \omega, \quad (76)$$

где $f'_{об}$ — фокусное расстояние объектива; $f'_{ок}$ — фокусное расстояние окуляра; D — диаметр входного зрачка; D' — диаметр выходного зрачка.

Существует несколько методов измерения видимого увеличения телескопических систем, основанных на использовании формулы (76).

Схема устройства для измерения видимого увеличения по угловому увеличению (рис. 111) состоит из коллиматора 1 и зрительной трубы 2 со шкалой. В фокальной плоскости объектива коллиматора установлена сетка с вертикальными штрихами. Визируя зрительную трубу на сетку коллиматора, определяют, сколько делений m_1 по шкале зрительной трубы содержится в изображении определенного интервала сетки коллиматора. Затем между коллиматором и зрительной трубой устанавливают измеряемую систему 3 и вновь определяют, сколько делений m_2 по шкале зрительной трубы содержится в изображении того же интервала сетки коллиматора. Отношение m_2/m_1 определит видимое увеличение телескопической системы

$$\Gamma_T = m_2/m_1.$$

Видимое увеличение телескопической системы по линейному увеличению определяют с помощью нивелирной рейки 1 (рис. 112, а), установленной от контролируемой системы на расстояние практической бесконечности ($\sim 50f'$). Сфокусировав телескопическую систему 2 на деления рейки, наблюдают одним глазом изображение делений рейки через систему, а другим, без нее, непосредственно рассматривая рейку невооруженным глазом.

Определяют, сколько делений m_1 рейки, видимых невооруженным глазом, укладывается в одном или нескольких делениях m_2 рейки, видимых через телескопическую систему. Видимое увеличение определяют по формуле

$$\Gamma_T = m_1/m_2.$$

Видимое увеличение телескопической системы по указанному методу можно определить также, установив стеклянную масштабную шкалу 3 вблизи объектива (рис. 112, б) телескопической системы 4. Изображение интервала шкалы измеряют с помощью динаметра 5, представляющего собой окуляр, в фокальной плоскости которого установлена сетка. Окуляр с сеткой могут перемещаться в тубусе динаметра. При измерении к наружному торцу окуляра телескопической системы прижимают тубус динаметра и передвигают в нем окуляр с сеткой, совмещают с ней изображение шкалы 3 по резкому изображению. Шкала освещается источником света 1 через матовое стекло 2.

Измерив размер изображения шкалы по сетке динаметра, вычисляют видимое увеличение

$$\Gamma_T = \frac{m_1\tau_1}{m_2\tau_2},$$

где m_1 — число делений стеклянной шкалы; τ_1 — цена одного деления шкалы, мм; m_2 — число делений сетки динаметра, укладываемых в m_1 делениях стеклянной шкалы; τ_2 — цена одного деления сетки динаметра.

Измерение видимого увеличения микроскопа. На оправках стандартных объективов и окуляров микроскопов гравировуют линейное увеличение объектива β и видимое увеличение окуляра

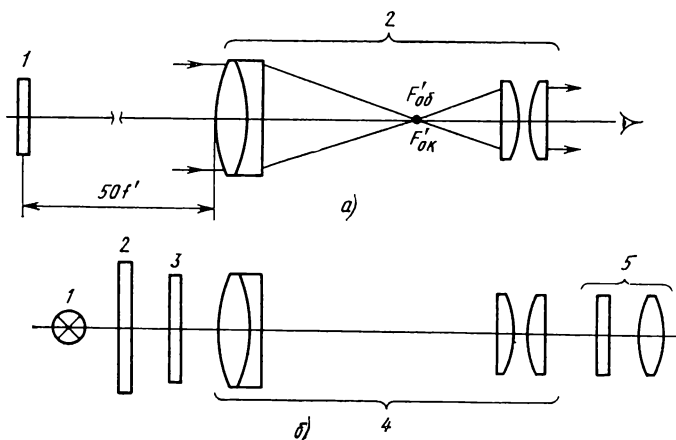


Рис. 112. Схема устройства для измерения видимого увеличения телескопической системы по линейному увеличению:

а — с помощью нивелирной рейки; б — с помощью стеклянной масштабной шкалы

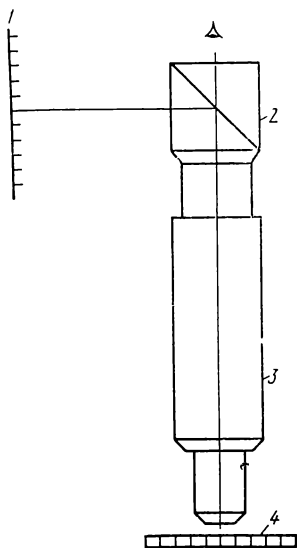


Рис. 113. Схема устройства для измерения видимого увеличения микроскопа

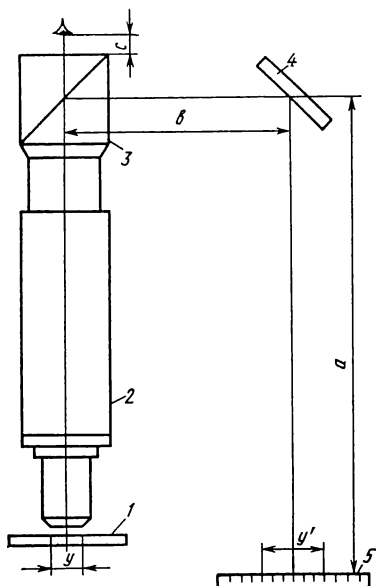


Рис. 114. Схема рисовального прибора

$\bar{\Gamma}_{ок}$. Общее видимое увеличение микроскопа $\bar{\Gamma}_м = \beta \bar{\Gamma}_{ок}$. В микроскопах специального назначения применяют нестандартные объективы и окуляры, тогда формулу видимого увеличения можно представить иначе.

Так как

$$\bar{\Gamma}_{ок} = 250/f'_{ок}; \quad \beta = -\Delta/f'_{об},$$

где 250 — расстояние наилучшего видения для нормального глаза, мм; Δ — оптический интервал, или оптическая длина тубуса; $f'_{об}$ и $f'_{ок}$ — соответственно фокусные расстояния объектива и окуляра микроскопа, увеличение микроскопа

$$\Gamma_м = -\frac{250\Delta}{f'_{об}f'_{ок}}.$$

Измерив $f'_{об}$ и $f'_{ок}$ и зная оптический интервал микроскопа, можно вычислить его видимое увеличение.

Непосредственное измерение видимого увеличения микроскопа выполняют сравнением двух отрезков. Один отрезок на шкале 1 (рис. 113) рассматривают непосредственно глазом через светоделительный кубик 2 с расстояния наилучшего видения (250 мм), другой на объекте-микрометре 4 — через микроскоп 3. Светоделительный кубик позволяет совместить изображения обоих отрезков и определить, какое число делений объекта-микрометра

укладывается в выбранном отрезке миллиметровой шкалы. Увеличение микроскопа определяется по формуле

$$\bar{\Gamma} = \frac{m_1 \tau_1}{m_2 \tau_2},$$

где m_1 — число делений отрезка шкалы; m_2 — число делений объекта-микрометра в отрезке шкалы; τ_1 и τ_2 — цена делений соответственно шкалы и объекта-микрометра.

Вместо светоделительного кубика используют рисовальный прибор или прибор Юдина. Принцип определения увеличения с помощью рисовального прибора такой же, как и со светоделительным кубиком. Рисовальный прибор (рис. 114), состоящий из светоделительного кубика 3 и зеркала 4, устанавливают на микроскоп 2. Глаз наблюдателя одновременно видит изображение объекта-микрометра и экран 5, расположенный в плоскости, перпендикулярной к тубусу микроскопа, на расстоянии наилучшего видения от глаза наблюдателя (250 мм). Сфокусировав микроскоп на резкое изображение объекта-микрометра 1, расположенного на предметном столике микроскопа, вращают зеркало 4, вводя в поле экран, освещенный дневным или искусственным светом. Для уравнивания освещенности в целях получения удовлетворительного видения изображения объекта-микрометра, экрана и острия карандаша, которым отмечают проектируемое на экран изображение, иногда вводят светофильтры, располагаемые перед кубиком.

Выбрав отрезок $y = m_2 \tau_2$ на объекте-микрометре, отмечают его границы на экране. Измерив расстояние l от экрана до глаза (состоящее из отрезка a — расстояния от экрана до оси вращения зеркала, длины b кронштейна зеркала и удаления c глаза от кубика) и размер y' изображения отрезка объекта-микрометра на экране, вычисляют увеличение микроскопа по формуле

$$\bar{\Gamma}_M = \frac{250 y'}{y l},$$

где $l \approx 250$ мм.

Прибор Юдина представляет собой телескопическую систему, состоящую из двух окуляров типа окуляра Рамсдена с одинаковыми фокусными расстояниями $f'_1 = f'_2$ и с увеличением $\Gamma_T = 1$. В фокальной плоскости окуляра, выполняющего роль объектива, установлена шкала, с помощью которой измеряют размер изображения. При измерении прибор Юдина устанавливают на окуляр микроскопа 2 (рис. 115).

Систему, состоящую из контролируемого микроскопа и прибора Юдина, можно рассматривать как микроскоп со сложным объективом, состоящим из объектива и окуляра микроскопа и объектива 3 прибора Юдина. Тогда видимое увеличение такой системы

$$\bar{\Gamma}_C = \bar{\Gamma}_M = \beta_{00} \bar{\Gamma}_Y,$$

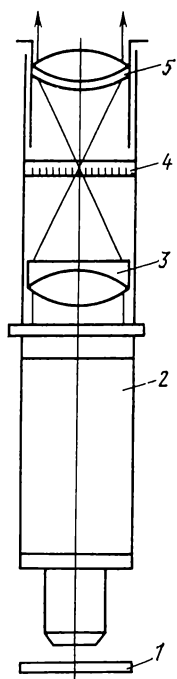


Рис. 115. Схема прибора Юдина для измерения видимого увеличения микроскопа

где $\beta_{об} = y'/y$ — линейное увеличение сложного объектива; $\bar{\Gamma}_ю$ — видимое увеличение окуляра 5 прибора Юдина.

Определение $\bar{\Gamma}_м$ с помощью прибора Юдина сводится к измерению размера y предмета и его изображения y' с помощью системы микроскоп — прибор Юдина, а затем вычислению по формуле

$$\bar{\Gamma}_м = \bar{\Gamma}_ю y' / y. \quad (77)$$

Размер y предмета выбирают по объекту-микрометру 1, установленному на предметном столике контролируемого микроскопа. Предмет рассматривают через систему прибор Юдина — микроскоп. Перемещением микроскопа добиваются резкого изображения объекта-микрометра, предварительно отфокусировав шкалу 4 прибора Юдина окуляром 5. Обе шкалы должны быть видны резко, без параллакса, и направления штрихов обеих шкал должны быть параллельны между собой. Размер y' изображения измеряют по шкале 4 прибора Юдина.

Измерение линейного увеличения микрообъектива. Для непосредственного измерения линейного увеличения микрообъективов на предметный столик микроскопа устанавливают объект-микрометр, фокусируют микроскоп на резкое изображение шкалы объекта-микрометра, затем вместо окуляра микроскопа устанавливают окуляр-микрометр. При этом подвижную трубку тубуса микроскопа необходимо вдвинуть до положения, при котором наблюдают резкое изображение шкалы объекта-микрометра, так как фокальная плоскость окуляра-микрометра расположена выше фокальной плоскости обычных окуляров. Контролируемый микрообъектив должен сохранить свое положение относительно объект-микрометра. Размер изображения отрезка шкалы объекта-микрометра измеряют окуляром-микрометром. Отношение измеренного размера изображения к значению выбранного отрезка шкалы объекта-микрометра есть линейное увеличение микрообъектива.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В визуальных приборах поле ограничивается диафрагмой, которая устанавливается в плоскости действительного изображения и называется диафрагмой поля, или полевой диафрагмой. Размер полевой диафрагмы определяется в процессе расчета системы. Форма полевой диафрагмы в визуальных при-

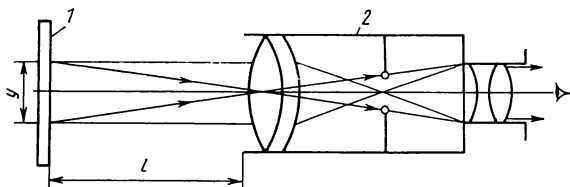


Рис. 116. Схема измерения поля телескопической системы в полевых условиях

борах, как правило, круглая. Для телескопических и фотографических систем размер поля измеряют в угловой мере, для луп и микроскопов — в линейной мере.

Измерение поля телескопической системы. Угловое поле 2ω телескопической системы — это удвоенный угол, под которым из центра входного зрачка виден диаметр полевой диафрагмы, расположенной в общей фокальной плоскости объектива и окуляра. Угловое поле $2\omega'$ окуляра — удвоенный угол, под которым из центра выходного зрачка виден диаметр полевой диафрагмы. Значения этих полей телескопической системы определяются по формулам

$$\operatorname{tg} \omega = - \frac{D_{\text{пд}}}{2f'_{\text{об}}}; \quad (78)$$

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{D_{\text{пд}}}{2f'_{\text{ок}}}, \quad (79)$$

где $D_{\text{пд}}$ — диаметр полевой диафрагмы; $f'_{\text{об}}$ и $f'_{\text{ок}}$ — фокусные расстояния соответственно объектива и окуляра телескопической системы.

Поле телескопической системы можно измерять с помощью нивелирной рейки, широкоугольного коллиматора и угломерных приборов.

В полевых условиях поле телескопической системы определяют по нивелирной рейке или по местным удаленным предметам.

При измерениях нивелирную рейку 1 (рис. 116) устанавливают перед измеряемой телескопической системой 2 перпендикулярно к ее визирной оси на расстоянии l , при котором деления рейки видны резко и без заметного на глаз параллакса (на практической бесконечности — не менее тридцати фокусных расстояний объектива). Наблюдая в телескопическую систему изображений рейки, определяют значение отрезка y рейки, ограниченного полевой диафрагмой. Измерив расстояние l от рейки до объектива, угол поля вычисляют по формуле

$$2 \operatorname{tg} \omega = y/l.$$

В лабораторных условиях поле телескопических систем определяют с помощью широкоугольного коллиматора или гонио-

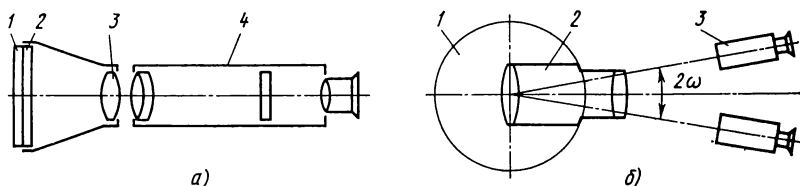


Рис. 117. Схемы измерения поля телескопических систем:
а — по широкоугольному коллиматору; б — на гониометре

метра. Широкоугольный коллиматор (рис. 117, а) состоит из объектива 3, в качестве которого используют высококачественный бездисторсионный широкоугольный фотографический объектив, и прозрачной шкалы 2 с матовым стеклом 1, обеспечивающим равномерное освещение либо естественным светом, либо лампочкой накаливания. Шкала 2, расположенная в фокальной плоскости объектива 3, имеет деления в двух взаимно перпендикулярных направлениях и градуирована как в угловых, так и в линейных единицах.

При измерениях телескопическую систему 4 устанавливают как можно ближе к коллиматору. Наблюдая в телескопическую систему, фиксируют крайние деления шкалы коллиматора, видимые в горизонтальном или вертикальном направлении. Угловое поле $2\omega = m\tau'$, где m — число делений шкалы, τ' — цена деления в угловой мере.

При измерениях поля телескопической системы на гониометре (рис. 117, б) совмещают ось вращения столика 1 гониометра с плоскостью входного зрачка контролируемой системы 2. С помощью зрительной трубы 3 гониометра наблюдают правый и левый края полевой диафрагмы, при этом снимают отсчет по лимбу. Разность отсчетов даст искомый угол поля телескопической системы в пространстве предметов.

Аналогично измеряют угловое поле в пространстве изображений, при этом ось вращения столика совмещают с плоскостью выходного зрачка телескопической системы.

Измерение линейного поля микроскопа. Измерение линейного поля $2y$ в пространстве предметов выполняют с помощью прозрачной масштабной шкалы (объекта-микрометра), установленной на предметный столик микроскопа. Рассматривая через микроскоп шкалу, фокусируют ее на резкое изображение перемещением всего микроскопа и определяют размер поля в предметной плоскости подсчетом числа m делений шкалы, которое укладывается по диаметру видимого круга. Измерения выполняют при нескольких положениях масштабной шкалы, вычислив среднее арифметическое значение из полученных отсчетов:

$$2y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i \tau}{n},$$

где τ — цена деления шкалы; n — число отсчетов.

Измерение поля фотографического объектива. Поле фотографического объектива ограничивается диаметром в плоскости наилучшего изображения, в пределах которого наблюдается удовлетворительное качество изображения, характеризующее допустимым падением освещенности и разрешающей способностью на краю поля. Значение разрешающей способности задается техническими требованиями на объектив, определяемыми условиями эксплуатации. Например, для некоторых широкоугольных объективов разрешающая способность на краю поля допускается в пределах $10 \dots 12 \text{ мм}^{-1}$. Для светосильных объективов хорошего качества, используемых в зеркальных фотоаппаратах, разрешающая способность в центре поля более 50 мм^{-1} , на краю — не менее 25 мм^{-1} .

Размер поля фотообъектива определяется по результатам фотографических испытаний, которые позволяют измерить фотографическую разрешающую способность для различных точек поля и падение освещенности по полю. Диаметр круга в плоскости изображения, в котором разрешающая способность и освещенность удовлетворяют предъявляемым требованиям к качеству изображения, определяет полезное поле объектива. В это поле вписывается кадр фотоаппарата, имеющий форму прямоугольника или квадрата. Угол поля объектива определяется по формуле

$$2 \operatorname{tg} \omega = D/f',$$

где D — диаметр круга качественного изображения, создаваемого объективом, равный диагонали кадра; f' — фокусное расстояние объектива.

Поле фотографического объектива можно измерять с помощью широкоугольного коллиматора и экрана, расположенного в плоскости изображения объектива. На экране рассматривают изображение шкалы коллиматора и по делениям, которые видны резко, определяют угловое значение поля.

В настоящее время измерение поля фотографического объектива выполняют лишь в исследовательских целях, так как поле надежно определяется на стадии абберационного расчета объектива.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРОВ И ПОЛОЖЕНИЙ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ЗРАЧКОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Параксиальное изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов называется входным зрачком оптической системы. Параксиальное изображение апертурной диафрагмы в пространстве изображений называется выходным зрачком оптической системы. Выходной зрачок является изображением входного зрачка.

Измерение диаметров входного и выходного зрачков телескопической системы. В простейшей телескопической системе, состоящей из объектива и окуляра, входным зрачком является

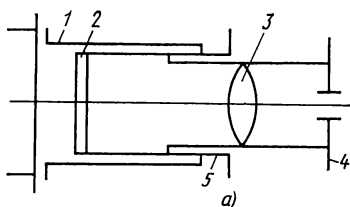
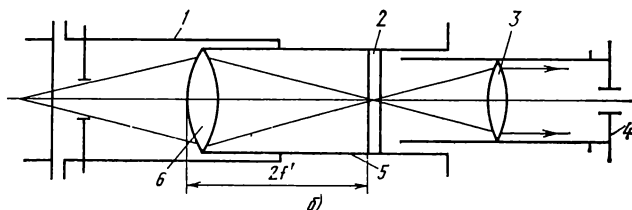


Рис. 118. Схемы динаметров:

а — Рамсдена; *б* — Чапского



оправа объектива, выходным — ее изображение, построенное окуляром.

Измерение диаметров и положений зрачков осуществляют с помощью динаметров (рис. 118).

Динаметр Рамсдена (рис. 118, *а*) представляет собой лупу 3 (окуляр) с увеличением $10 \dots 15\times$, в фокальной плоскости которой установлена стеклянная шкала 2, перемещающаяся относительно лупы для обеспечения резкого видения штрихов шкалы. Совместно с лупой 3 шкала 2 перемещается относительно неподвижного тубуса 1, который соединяется с торцом окуляра телескопического прибора. На цилиндрической поверхности оправы 5 лупы нанесены штрихи с интервалом в 1 мм, по которым отсчитывается расстояние от опорного торца тубуса 1 до стеклянной шкалы.

Динаметр Чапского (рис. 118, *б*) в отличие от динаметра Рамсдена имеет дополнительный объектив 6, установленный перед шкалой 2, на двойном фокусном расстоянии. Следовательно, в плоскости шкалы динаметра резко видны предметы, расположенные на двойном фокусном расстоянии от объектива 6. Таким образом, динаметр Чапского позволяет измерять размер зрачка, находящегося внутри телескопической системы.

В заднем фокусе лупы в обоих динаметрах расположена небольшая диафрагма 4, которая создает телецентрический ход лучей в пространстве изображений. Поэтому незначительные погрешности при фокусировке динаметра на резкое изображение зрачка контролируемой системы не влияют на точность измерений.

При измерении диаметра входного зрачка (оправа объектива) телескопической системы перед объективом устанавливают вплотную к его оправе стеклянную шкалу 1 (рис. 119, *а*) и рассматривают ее изображение через динаметр, предварительно фокусируя лупу на резкое изображение штрихов шкалы динаметра 2. По числу делений стеклянной шкалы 1, видимых в поле динаметра, определяют значение диаметра входного зрачка.

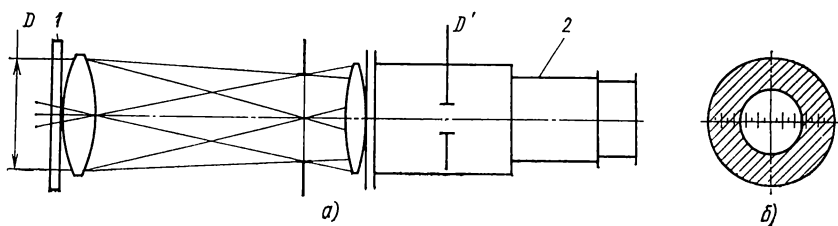


Рис. 119. Устройство для измерения диаметров входного и выходного зрачков: *а* — схема; *б* — изображение зрачка выхода

Для измерения диаметра выходного зрачка телескопической системы и определения положения выходного зрачка объектив освещают рассеянным светом и, прижав тубус динаметра к наружному краю оправы окуляра телескопической системы, передвигают оправу 5 в тубусе 1 (см. рис. 118, *а*) до тех пор, пока не будет виден резко выходной зрачок системы. Диаметр выходного зрачка, имеющего вид светлого круга, измеряют по шкале динаметра, а положение выходного зрачка от торца окуляра телескопического прибора определяют по штрихам, нанесенным на оправе 5, с погрешностью 0,1 мм.

Измерение диаметра выходного зрачка микроскопа. Диаметр выходного зрачка микроскопа, так же как и телескопической системы, измеряют с помощью динаметра Рамсдена. При измерении микроскоп фокусируют на равномерно освещенный предмет (белый лист бумаги) и, установив на окуляр динаметр, перемещением оправы шкалы совместно с окуляром динаметра находят наиболее резкое изображение зрачка в виде светлого кружка, который измеряют по шкале динаметра.

Измерение диаметров зрачков фотографического объектива. Апертурная диафрагма фотографического объектива расположена внутри объектива и представляет собой ирисовую диафрагму, диаметр которой может изменяться. Диаметр входного и выходного зрачков измеряют визуальным методом на универсальном инструментальном микроскопе или измерительном микроскопе с фокусным расстоянием не менее 50 мм. При измерении диаметра входного зрачка контролируемый объектив помещают на предметный столик входным зрачком к микроскопу. Снизу, со стороны выходного зрачка, объектив освещают рассеянным светом. Микроскоп фокусируют на изображение ирисовой диафрагмы при меньшем диаметре. Затем, полностью открыв диафрагму, совмещают перекрестие сетки микроскопа с изображением левого и правого края диафрагмы и снимают отсчет по шкале перемещения. Разность отсчетов определит значение диаметра входного зрачка. Для определения диаметра выходного зрачка объектив устанавливают выходным зрачком к микроскопу и выполняют аналогичные измерения.

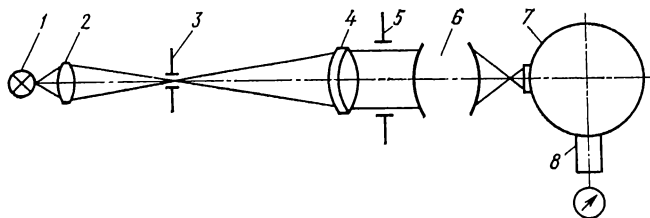


Рис. 120. Схема прибора для измерения диаметра входного зрачка фотографического объектива фотоэлектрическим методом

Положение зрачков определяют, фокусируя микроскоп на торец оправы объектива (или окуляра) и на изображение диафрагмы для первого и второго положений объектива. Разность отсчетов между фокусировками соответствует расстоянию между торцом оправы (объектива или окуляра) и входным или выходным зрачком.

Точность измерения определяется погрешностью шкал перемещений и чувствительностью наводок. На измерительном микроскопе диаметры зрачков определяются с погрешностью $\pm 0,01$ мм.

Диаметр входного зрачка можно измерить фотоэлектрическим методом. Этот метод основан на сравнении фототоков, создаваемых световыми потоками, прошедшими в одном случае через контролируемый объектив, в другом — через контролируемый объектив и калибровочную диафрагму. Устройство, предназначенное для измерений фотоэлектрическим методом (рис. 120), состоит из источника света 1, конденсора 2, диафрагмы 3, расположенной в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора, калибровочной диафрагмы 5, фотометрического шара 7, в стенке которого закреплен фотоэлектронный умножитель 8, и регистрирующего прибора. При измерениях контролируемый объектив 6 устанавливают между коллиматором и фотометрическим шаром. Диаметр коллиматора должен быть больше диаметра контролируемого объектива. Фотометрический шар устанавливают вблизи фокальной плоскости контролируемого объектива, так, чтобы весь световой поток, прошедший через объектив, попал в шар. Рассеянный световой поток преобразуется умножителем 8 в фототок, который регистрируется гальванометром или микроамперметром, без калибровочной диафрагмы I_1 и с калибровочной диафрагмой I_2 .

Размер калибровочной диафрагмы предварительно выбирают равным диаметру входного зрачка, рассчитанному по значениям номинального относительного отверстия и фокусного расстояния контролируемого объектива. В процессе измерения размер калибровочной диафрагмы уточняют из условия $I_2 < I_1$ не более

чем на 10 ... 15 %. Диаметр входного зрачка контролируемого объектива

$$D = D_{\kappa} \sqrt{I_1/I_2}, \quad (80)$$

где D_{κ} — диаметр калибровочной диафрагмы.

Преимущество такого метода измерений зрачка заключается в том, что можно выполнять измерения изображения диафрагмы с отступлениями от круглой формы. В реальных объективах апертурная диафрагма представляет собой многогранное отверстие. В этом случае на установке определяют диаметр круга, эквивалентный по площади действующему зрачку.

Относительную погрешность измерений, характеризующую точность метода, можно определить, прологарифмировав и продифференцировав формулу (80):

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta I_2}{I_2} \right) + \frac{\Delta D_{\kappa}}{D_{\kappa}}.$$

Так как диаметр калибровочной диафрагмы измеряется с большой точностью, погрешность измерения диаметра зрачка в основном определяется точностью измерений фототоков. Погрешность измерения фототоков зависит от их абсолютного значения, точности регистрирующего прибора, стабильности источника света и других факторов.

На практике относительная погрешность измерений зрачка фотоэлектрическим методом составляет 1 ... 3 %.

6. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

К световым характеристикам оптических приборов относятся коэффициенты пропускания τ , рассеяния σ , виньетирования K_Q (K_{ω}), распределения освещенности по полю $E_{\omega'}$, а также цветопередача.

Коэффициентом пропускания τ оптического прибора называют отношение светового потока Φ , прошедшего через прибор, к световому потоку Φ_v , падающему на него:

$$\tau = \Phi/\Phi_v.$$

Коэффициентом рассеяния σ оптического прибора называют отношение рассеянного светового потока излучения Φ_{σ} к падающему световому потоку Φ_v :

$$\sigma = \Phi_{\sigma}/\Phi_v. \quad (81)$$

Коэффициент рассеяния характеризует свойство оптической системы создавать постороннюю засветку в плоскости изображения. Источниками засветки, т. е. постороннего света в оптической системе, являются поверхности оптических деталей, внутренние поверхности оправ, выколки, царапины, пузыри и свиля. Посто-

ронний свет является частью всего прошедшего через оптическую систему светового потока, которая не участвует в построении изображения, а накладывается на него, тем самым понижая контраст изображения.

Виньетирование оптического прибора происходит ввиду срезания наклонных пучков лучей оправами линз и диафрагмами, установленными внутри прибора. Коэффициентом виньетирования K_Q называют отношение площади Q_ω действующего отверстия входного зрачка для данного угла поля к его общей площади Q_0 :

$$K_Q = Q_\omega / Q_0. \quad (82)$$

Для объективов с широким полем виньетирование достигает большого значения, что приводит к падению освещенности на краях поля. Для некоторых фотографических объективов виньетирование допускается 50 %.

Падение освещенности по полю в плоскости изображения происходит не только вследствие виньетирования, но и в результате падения лучей на преломляющие поверхности под разными углами и поглощения света в стекле. Для многих фотографических объективов освещенность по полю уменьшается от центра к краю пропорционально $\cos^4 \omega'$:

$$E_{\omega'} = E_0 K_Q \cos^4 \omega',$$

где E_0 — освещенность в центре поля, ω' — угол поля изображения.

Исключение составляют широкоугольные объективы, рассчитанные по методу М. М. Русинова с учетом абберационного виньетирования. В таких объективах распределение освещенности по полю подчиняется закону третьей или второй степени косинуса угла поля изображения.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ

Коэффициент пропускания τ , как правило, измеряют для осевого потока излучения. Измерения выполняют как для телескопических систем, так и для фотографических объективов на универсальном фотометре. Фотометр (рис. 121, а) состоит из коллиматора и фотоприемного устройства. Источник света 1 (лампа накаливания) через конденсор 2 освещает круглую диафрагму 3 диаметром 1 ... 2 мм, расположенную в фокальной плоскости коллиматорного объектива 4. Пучок параллельных лучей, вышедших из коллиматора, ограничивается ирисовой диафрагмой 5, диаметр которой на 2 ... 3 мм меньше входного отверстия контролируемой системы 6. В качестве фотоприемного устройства применяют фотометрический шар 8 диаметром 200 ... 300 мм со встроенным селеновым фотоэлементом 9. Фотометрический шар позволяет исключить погрешности измерений, обусловленные неравномерностью чувствительности светочувствительной площадки фотоэлемента.

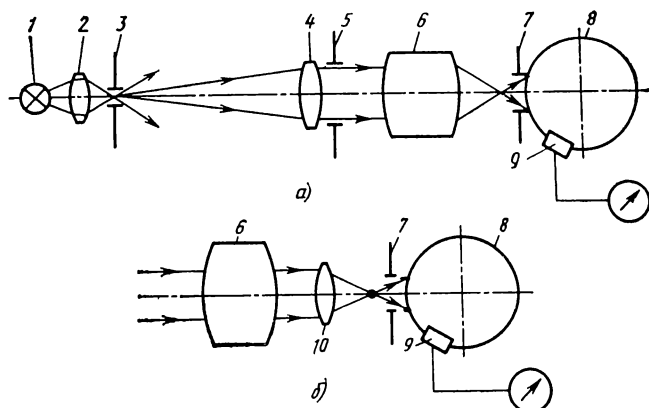


Рис. 121. Схемы измерения коэффициента пропускания на универсальном фотометре.

а—для фотографических объективов; *б*—для телескопических систем

Регистрирующим прибором служит зеркальный гальванометр, измеряющий фототок фотоэлемента, пропорциональный световому потоку, вошедшему в шар. В плоскости изображения перед фотометрическим шаром устанавливают ограничительную диафрагму 7, чтобы исключить посторонний свет. Измерения ведут в темном помещении. Установив контролируемый прибор перед коллиматором, снимают отсчет I_1 по шкале гальванометра. Затем снимают отсчет I_2 по шкале гальванометра без контролируемого прибора.

При измерении телескопических систем за окуляром прибора устанавливают дополнительную фокусирующую линзу 10 (рис. 121, б), чтобы весь световой поток, прошедший через систему, попал в отверстие шара. Отношение средних арифметических значений нескольких отсчетов I_1 и I_2 даст коэффициент пропускания $\tau = I_1/I_2$. Погрешность измерения не превышает 5 %.

Для сложных телескопических систем, состоящих из многолинзовых объективов, призм, зеркал, а также для фотографических объективов необходимо знать спектральный коэффициент пропускания τ_λ . В этом случае измерения проводят в монохроматическом свете.

Схема устройства для измерения спектрального пропускания (рис. 122) состоит из монохроматора 1, обеспечивающего монохроматическое излучение, шарового осветителя 3, дающего излучение рав-

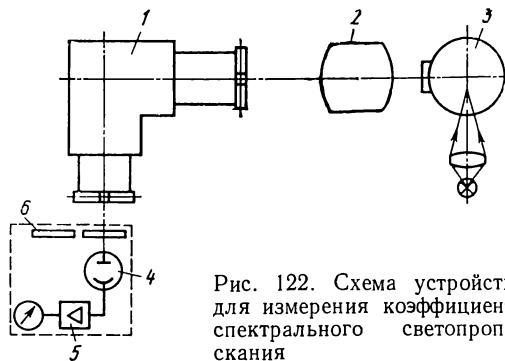


Рис. 122. Схема устройства для измерения коэффициента спектрального светопропускания

Т а б л и ц а 15

Коэффициент пропускания τ
для некоторых объективов

| Объектив | $\frac{D}{f'}$ | f' , мм | τ , % |
|-------------|----------------|-----------|------------|
| Мир-1 | 1 : 2,8 | 37 | 80 |
| Гелиос-44 | 1 : 2 | 58 | 81 ... 83 |
| Таир-11 | 1 : 2,8 | 135 | 85 |
| Юпитер-9 | 1 : 2 | 85 | 75 ... 80 |
| Индустар-50 | 1 : 3,5 | 50 | 80 ... 85 |

номерной яркости, и приемного устройства 4 с регистрирующим прибором. Контролируемый прибор 2 устанавливают между входной щелью монохроматора и шаровым осветителем. При измерениях ширину входной и выходной щелей выбирают одинаковой.

В качестве приемного устройства в схеме ис-

пользован вакуумный фотоэлемент 4, имеющий линейную световую характеристику, с усилителем постоянного тока 5, на выходе которого подключен микроамперметр. Для устранения влияния рассеянного света введены сменные светофильтры 6. При измерениях осветитель должен быть установлен так, чтобы при перемещении его вместе с объективом вдоль оптической оси показания микроамперметра не изменялись.

Коэффициент пропускания для определенной длины волны определяют как отношение отсчетов, определяемых по микроамперметру и пропорциональных световому потоку, падающему на фотоприемник от осветителя через прибор и без него для каждой длины волны:

$$\tau_{\lambda} = I'_{\lambda}/I''_{\lambda},$$

где $I'_{\lambda} = k\Phi_{\lambda}$ — отсчет с установленным прибором; $I''_{\lambda} = k\Phi_{0\lambda}$ — отсчет без прибора; Φ_{λ} — световой поток заданной длины волны, прошедший через прибор; $\Phi_{0\lambda}$ — световой поток, падающий на прибор, для той же длины волны; k — коэффициент пропорциональности для данной установки.

Точность метода измерения τ_{λ} составляет 2 ... 3 %. Основными погрешностями измерения являются нестабильность источника излучения, нелинейность световой характеристики фотоприемного устройства и нестабильность показаний регистрирующего прибора.

Значения коэффициента пропускания τ для некоторых фотографических объективов приведены в табл. 15.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ

Метод измерения коэффициента рассеяния σ оптических систем основан на сравнении образуемых контролируемым объективом освещенностей изображения черного предмета, расположенного на равномерно освещенном белом фоне, и изображения этого фона. Освещенности изображения черного предмета и фона пропорциональны соответственно световому потоку, рассеянному объективом, и потоку, падающему на объектив.

Измерение освещенностей выполняют фотоэлектрическим способом. Устройство для измерения коэффициента рассеяния (рис. 123, а) состоит из шарового коллиматора и приемного устройства. Шаровой коллиматор представляет собой фотометрический шар 3, в стенке которого установлен коллиматорный объектив 5 с фокусным расстоянием, равным диаметру шара. С противоположной стороны в шаре на оптической оси объектива 5 имеется отверстие 2, с задней стороны которого расположена светоловушка 1, выполненная в виде пустотелого шара или колена, оклеенного внутри черным бархатом, и служащая для имитации черного предмета. Диаметр отверстия в шаре изменяется с помощью набора кольцевых пробок 11 (рис. 123, б) и рассчитывается по формуле

$$D_r = D_{из} D_{ш} / f'_{об}, \quad (83)$$

где $D_{из}$ — диаметр изображения черного отверстия 2 (рис. 123, а), создаваемого контролируемым объективом 6; $D_{ш}$ — диаметр шара; $f'_{об}$ — фокусное расстояние контролируемого объектива.

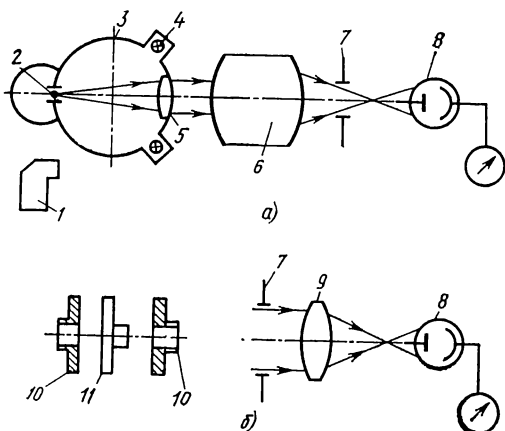
Внутренняя поверхность шара окрашена белой матовой краской и освещена лампами накаливания 4, помещенными в специальные гнезда за пределами освещаемой сферы. Яркость внутренней поверхности шара должна быть равномерной. Световой диаметр объектива коллиматора должен быть больше входного зрачка контролируемого объектива, который устанавливается как можно ближе к коллиматору, чтобы обеспечить засветку в пределах возможно большего телесного угла.

Приемное устройство состоит из фотоприемника 8 с ирисовой диафрагмой 7 и регистрирующего прибора. При контроле телескопических систем вводится дополнительная короткофокусная линза 9 (рис. 123, б) для переноса плоскости изображения системы в плоскость светочувствительной площадки приемника. В качестве приемника излучения используют фотоэлементы или фотомножители с линейной световой характеристикой. Ирисовая диафрагма 7 регулирует размер светочувствительной площадки фотоприемника, который должен быть меньше на 15 ... 20% изображения черного предмета.

При измерениях коэффициента рассеяния оптической системы в отверстие шара вставляется кольцевая пробка 10, диаметр

Рис. 123. Устройство для измерения коэффициента светорассеяния:

а — объектива; б — телескопической системы



которой определяется по формуле (83). Фокусируя контролируемую систему по матовому стеклу, находят ее плоскость изображения, в которой устанавливают фотоприемник с ирисовой диафрагмой. Показания регистрирующего прибора пропорциональны освещенности $E_{\text{ч}}$ изображения черного предмета на белом фоне. Затем пробку с отверстием заменяют сплошной белой пробкой 11, окрашенной той же краской, что и внутренняя поверхность шара. Не меняя положений контролируемого объектива и фотоприемника, снимают второе показание по шкале регистрирующего прибора, пропорциональное в этом случае освещенности $E_{\text{ф}}$ изображения белого фона. Освещенности $E_{\text{ч}}$ и $E_{\text{ф}}$ измеряют несколько раз и находят средние арифметические значения показаний, по которым согласно формуле (81) вычисляют коэффициент рассеяния

$$\sigma = \Phi_{\sigma} / \Phi_r = E_r / E_{\text{ф}}.$$

Погрешность измерений на рассмотренной установке не превышает 10 % измеряемой величины. Значение коэффициента рассеяния для фотографических объективов составляет 2,5 ... 3 %; для телескопических систем коэффициент рассеяния допускается 6 %.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВИНЬЕТИРОВАНИЯ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ

Коэффициент виньетирования определяют на оптической скамье с поворотным устройством или на специальных установках, позволяющих зафиксировать площади сечения пучков лучей оптической системы на различных углах поля. Контролируемый объектив (рис. 124, а) устанавливают задней узловой точкой над осью вращения поворотного устройства 6, а в заднем фокусе помещают диафрагму 3, освещенную источником света 1 через конденсатор 2.

За объективом 4 помещают экран 5, в качестве которого можно использовать матовое стекло или фотобумагу. При вращении поворотного устройства вместе с объективом в обе стороны от осевого положения через 5 или 10° наблюдают или экспонируют освещенные фигуры, имеющие форму эллипсов. Площади эллипсов уменьшаются от центра к краю поля до полного исчезновения (рис. 124, б). Центральное изображение, соответствующее осевому положению оптической системы, имеет форму круга, площадь которого принимается за единицу.

Измерив площади фигур геометрическим или аналитическим методом, определяют коэффициент виньетирования согласно формуле (82).

Так как при вращении объектива 4 вокруг узловой точки экран 5 остается неподвижным (см. положение 1 на рис. 124, а), для получения действительных размеров площадей фигур диафрагму 3 необходимо смещать от объектива на значение

$$\Delta f' = f' (\sec \omega_i - 1),$$

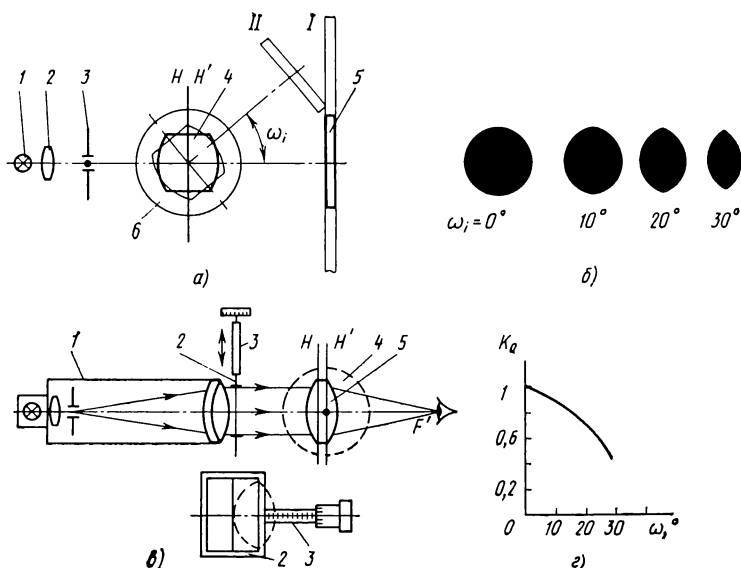


Рис. 124. Схема измерения коэффициента виньетирования фотографических объективов:

a — для измерения коэффициента виньетирования по площадям действующих отверстий; *б* — выходные зрачки контролируемого объектива при различных углах поля; *в* — для измерения коэффициента по горизонтальным размерам действующих отверстий; *г* — график зависимости $K_Q = f(\omega)$; *H*, *H'* — главные плоскости объектива 4

чтобы диафрагма оставалась в фокусе при повороте объектива на различные углы ω_i . Если при вращении объектива на разные углы экран остается в положении *II*, то площади фигур необходимо разделить на $\cos \omega_i$.

Вместо площадей можно измерять горизонтальные размеры действующих отверстий на данном угле поля и диаметр центрального круга при осевом положении оптической системы. Тогда коэффициент виньетирования определится как отношение горизонтальных размеров $2m_\omega$ действующих отверстий к диаметру D_0 центрального круга:

$$K_Q = 2m_\omega / D_0.$$

Измерения размеров действующих отверстий зрачков при различных углах падения пучков лучей можно выполнить на оптической скамье, состоящей из коллиматора 1 (рис. 124, *в*), передвижной рамки с нитью 2, с помощью которой измеряется видимый диаметр действующего зрачка объектива, и объективодержателя 4, вращающегося вокруг вертикальной оси. Наблюдая из фокальной плоскости контролируемого объектива 5 точечную диафрагму, расположенную в фокальной плоскости объектива коллиматора, увидим резко очерченный светлый круг, являющийся выходным зрачком объектива, и нить в передвижной рамке, перемещение

которой отсчитывается по шкале 3. При измерении нить перемещают перпендикулярно к оси установки, последовательно совмещая ее с краями зрачка объектива. Разность отсчетов по шкале перемещений рамки определяет горизонтальный размер действующего отверстия объектива. Поворачивая объективодержатель вокруг вертикальной оси, повторяют такие же измерения для нескольких углов поля.

По результатам вычисления коэффициента виньетирования строят график зависимости K_Q от угла поля ω (рис. 125, г).

Коэффициент виньетирования измеряется у опытных образцов объективов и при исследовании характеристик оптических систем.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ПО ПОЛЮ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА

Распределение освещенности по полю изображения измеряют фотоэлектрическим способом или фотографическим с последующим фотометрированием фотографического изображения. В том и другом способе используют равномерный по яркости протяженный источник света, в качестве которого применяют фотометрический шар или полусферу.

Фотоэлектрический способ более производителен, но не пригоден для измерения распределения освещенности по полю объективов, предназначенных для 8-миллиметровых кинокамер, ввиду конечных размеров светочувствительного слоя фотоприемника. Кроме того, затруднено измерение на краях поля. Схема устройства (рис. 125, а), предназначенная для измерения фотоэлектрическим методом измерения, состоит из равномерного осветителя 1, выполненного в виде полусферы, внутренняя поверхность которой окрашена белой диффузно отражающей краской, освещаемой лампами накаливания 2, расположенными по кольцу вокруг выходного отверстия 3 диаметром ~ 200 мм (осветитель может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях или поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через плоскость входного зрачка объектива); объективодержателя 4 с контролируемым объективом 7; приемного устройства, содержащего диафрагму 5, фотоприемник 6 и регистрирующий прибор.

При измерениях освещенности диафрагма 5 с фотоприемником 6 перемещается перпендикулярно к оптической оси в различные точки изображения, образуемого контролируемым объективом. Перемещение фиксируется по миллиметровой шкале. Измерение распределения освещенности выполняют при максимальном относительном отверстии контролируемого объектива 7.

На основании результатов измерения определяют среднее арифметическое значение для каждой пары равноотстоящих точек и строят график $E = f(y')$, где y' — расстояние от центра поля до изображения; E — освещенность данного участка изображения.

Точность измерения распределения освещенности по полю составляет приблизительно 5 % и зависит в основном от разме-

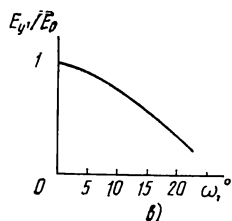
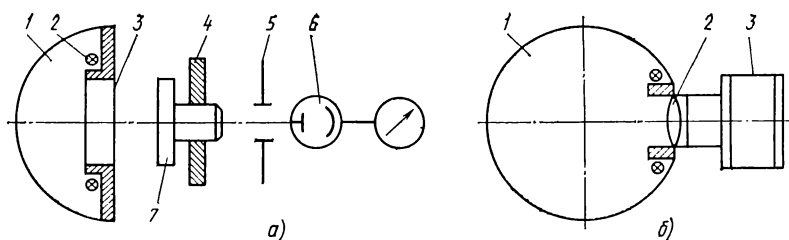


Рис. 125. Устройство для определения распределения освещенности по полю изображения фотографического объектива:

а — схема фотоэлектрического метода; б — схема фотографического метода; в — график зависимости распределения освещенности от угла поля

ров и чувствительности фотоприемника и линейности его световой характеристики.

Фотографический метод измерения распределения освещенности более трудоемок, но пригоден для измерения освещенности изображения любого размера. Схема установки, предназначенная для измерения этим методом, состоит из равнояркого источника 1 (рис. 125, б) в виде фотометрического шара, в отверстие которого устанавливается контролируемый объектив 2 с фотокамерой 3. После экспонирования и обработки снимка равнояркого источника освещения измеряют плотность D почернения фотоснимка на фотометре через выбранные интервалы по диагонали кадра. В фотоматериал впечатывается стандартный сенситометрический клин для определения характеристической кривой почернения фотоматериала $D = f(H)$, где $H = Et$ — экспозиция; E — освещенность изображения; t — время экспонирования изображения источника света, которое задается по экспонометру в виде кратковременной вспышки шара и постоянно для всех точек поля и центра.

По экспозиции в точках поля H_y и в центре H_0 , определяемых по зависимостям $H_y = E_y t$ и $H_0 = E_0 t$, строят график распределения освещенности по полю изображения (рис. 125, в) на основе зависимости

$$H_y/H_0 = E_y/E_0.$$

Значение освещенности в центре поля изображения принимают за единицу, а по полю берут среднее арифметическое значение симметричных измерений.

Погрешность фотографического метода составляет 8 ... 10 % при одинаковых условиях экспонирования и проявления фотоматериала.

Распределение освещенности по полю измеряется у опытных образцов объективов и при исследовании характеристик оптических систем.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ

Степень соответствия цветовой гаммы предмета цветовой гамме изображения, создаваемого объективом, называется цветопередачей объектива. Цветопередача объектива определяется его спектральной характеристикой, которая зависит от спектральной характеристики материалов, из которых изготовлены компоненты объектива, и от спектральной характеристики просветляющих слоев их поверхностей. Оценивают цветопередачу объектива совместно с приемником, воспринимающим изображение. Например, для трехслойного цветного фотоматериала каждый объектив характеризуется эффективными коэффициентами пропускания $\tau_{\lambda, c}$, $\tau_{\lambda, з}$, $\tau_{\lambda, к}$ объектива для трех зон спектра, соответствующих зонам чувствительности цветного фотоматериала (синего, зеленого и красного цветов) или в логарифмических единицах эффективными плотностями для тех же зон.

Свойство фотографических объективов изменять соотношение трех цветоделенных (зональных) потоков некоторого стандартного источника при изображении на фотопленке называется фотографической цветностью объектива. Фотографическая цветность объектива выражается разностью значений трех эффективных плотностей (синей, зеленой и красной областей спектра в пределах 360 ... 680 нм) и эффективной плотностью зеленой зоны:

$$\Delta D_c = D_c - D_z; \quad \Delta D_z = D_z - D_k = 0; \quad \Delta D_k = D_k - D_z.$$

Эти три значения разностей ΔD_c , ΔD_z , ΔD_k образуют формулу цветности, которая характеризует цветопередачу фотографического объектива, т. е. показывает избирательность.

Для определения качества цветопередачи фотографических объективов применяются три метода:

1) расчетный метод определения фотографической цветопередачи, основанный на измерении коэффициента τ_{λ} спектрального пропускания;

2) колориметрический метод, основанный на измерении отклонений координат цветности стандартного источника A ;

3) фотоэлектрический метод определения цветопередачи на зонном фотометре.

По первому методу цветопередачу объектива можно определить уже на стадии оптического расчета. Вычислив τ_{λ} для оптической системы объектива, рассчитывают эффективные коэффициенты пропускания $\tau_{\lambda, c}$, $\tau_{\lambda, з}$, $\tau_{\lambda, к}$ для трех указанных цветовых зон. Затем, определив логарифмическое выражение для отношений $\tau_{\lambda, c}/\tau_{\lambda, з}$; $\tau_{\lambda, з}/\tau_{\lambda, к}$, $\tau_{\lambda, к}/\tau_{\lambda, з}$, получают расчетную формулу

цветности, по которой судят о пригодности рассчитанной оптической схемы по цветопередаче.

Для готовых образцов объективов используют устройство (см. рис. 122), предназначенное для измерения коэффициента τ_λ спектрального пропускания. Затем рассчитывают эффективный коэффициент пропускания для зоны чувствительности каждого слоя фотоматериала:

$$\tau_{э. с (з. к)} = \frac{A_{\tau_c (з. к)}}{A_{с (з. к)}},$$

где A_c , A_z , A_k — актиничные световые потоки, вычисленные для трех слоев цветного фотоматериала; A_{τ_c} , A_{τ_z} , A_{τ_k} — актиничные световые потоки с учетом спектрального пропускания объектива.

Аналитические выражения актиничных потоков имеют вид

$$A = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} S_\lambda E_\lambda \rho_\lambda d\lambda;$$

$$A_\tau = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} S_\lambda E_\lambda \rho_\lambda \tau_\lambda d\lambda,$$

где S_λ — спектральная чувствительность фотоматериала; E_λ — распределение энергии в спектре источника излучения, λ_1 , λ_2 — спектральный диапазон чувствительности соответствующего слоя фотоматериала; ρ_λ — спектральная отражательная способность объекта фотографирования.

В колориметрическом методе используют способность человеческого глаза улавливать качественные различия между двумя излучениями различного спектрального состава. Цветовые различия, возникающие в спектре излучения стандартного источника после прохождения через объектив, измеряют с помощью колориметра.

Цветопередачу контролируемого объектива оценивают по изменению координат точек цветности стандартного источника света в цветовом поле, измеряя эти координаты с контролируемым объективом и без него. Изменение координат соответствует искажению цветности стандартного источника света, вносимому контролируемым объективом. Смещение точки цветности в пространстве цветов фиксируется на цветовом графике.

Измерение координат точек цветности стандартного источника с учетом светопропускания контролируемого объектива выполняют универсальным фотоэлектрическим колориметром УФК-2. Прибор (рис. 126) состоит из источника света 1 с молочным стеклом 2, представляющего собой стандартный источник, объективодержателя 3, колориметрической головки 4, фотоприемника 5 и регистрирующего устройства.

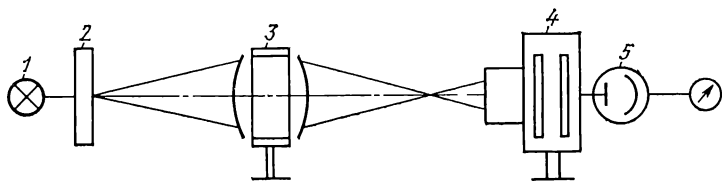


Рис. 126. Схема колориметра для измерения формулы цветности фотографического объектива

Режим излучения источника света 1 поддерживают постоянным, обеспечивая цветовую температуру равнорядного экрана, соответствующую стандартному источнику. Контролируемый объектив располагают соосно измерительной головке колориметра, так, чтобы входное окно головки колориметра было полностью заполнено светом. Объектив проверяют при максимальном относительном отверстии.

Спектральная чувствительность фотоприемника с помощью набора корригирующих светофильтров приводится к спектральной чувствительности глаза. Колориметр снабжен цветовым графиком, изображающим часть поля цветового треугольника с нанесенным на нем допусковым эллипсом рассеяния с координатами точки цветности стандартного источника (рис. 127). Допусковый эллипс рассеяния с учетом спектрального пропускания объектива получен экспериментально, путем сопоставления результатов фотографических испытаний с результатами колориметрических измерений. Аналитическое выражение допускового эллипса, аппроксимированное в международной системе координат цветности, представляет собой уравнение кривой второго порядка:

$$7,274y^2 - 8,504xy + 13,454x^2 - 8,594x - 2,1115y + 2,354 = 0.$$

При измерениях по шкале колориметрической головки последовательно устанавливаются буквы X; Y; Z и по регистрирующему устройству соответственно определяют значения фототоков I_x , I_y , I_z , затем вычисляют относительные компоненты цвета x' , y' , z' , связанные со значениями фототоков соотношениями

$$x' = C_x I_x - 0,4 C_y I_y + 0,2 C_z I_z;$$

$$y' = C_y I_y; \quad z' = C_z I_z,$$

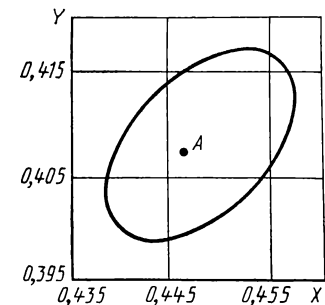
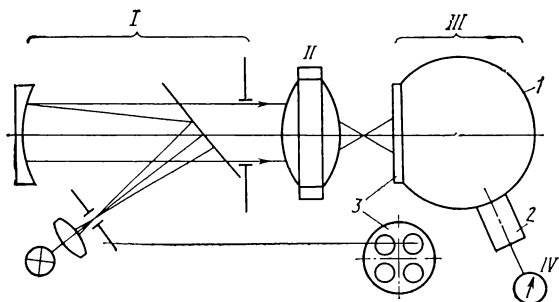


Рис. 127. Часть поля цветового треугольника с допусковым эллипсом рассеяния

где C_x , C_y , C_z — постоянные коэффициенты, определяемые при градуировке и приведенные в паспорте колориметра.

Рис. 128. Схема зонного фотометра для контроля качества цветопередачи объективов



Координаты точки цветности определяют из соотношений

$$X = \frac{x'}{x' + y' + z'}; \quad Y = \frac{y'}{x' + y' + z'}$$

и наносят на цветовой график в виде точки (см. рис. 127). Объектив считается удовлетворительным по цветопередаче, если измеренные координаты точки цветности лежат внутри допускового эллипса. На фотоэлектрическом колориметре УФК-2 могут быть измерены фотографические объективы с фокусным расстоянием 6 ... 300 мм и относительными отверстиями 1 : 1,5 ... 1 : 5,6. Погрешность определения координат точки цветности, установленная на основе экспериментального исследования, составляет $\pm 0,002$.

Фотоэлектрический метод определения цветопередачи объектива зонным фотометром основан на измерении балансного соотношения эффективных коэффициентов светопропускания объектива для трех зон спектра, соответствующих зонам чувствительности цветного фотоматериала. Зонный фотометр (рис. 128) состоит из зеркального коллиматора I, объективодержателя II, измерительного устройства III и регистрирующего прибора IV. В качестве источника света использована лампа накаливания с цветовой температурой $T_{\text{цв}} = 2854$ К (стандартный источник).

Измерительное устройство представляет собой фотометрический шар I, в который вмонтирован фотоприемник 2 и турель 3 со сменными корригирующими светофильтрами. Последовательное включение светофильтров приводит спектральную чувствительность фотоприемника соответственно к спектральной чувствительности сине-, зелено-, и красночувствительных слоев цветного фотоматериала. Спектральная характеристика фотоприемника является основой для расчета требуемых корригирующих светофильтров. Соотношения показаний N_c , N_z , N_k на регистрирующем приборе пропорциональны световым потокам Φ_c , Φ_z , Φ_k , падающим на фотоприемник от коллиматора при установленных синем, зеленом и красном корригирующих светофильтрах, относительно потока, прошедшего через зеленый светофильтр:

$$\Phi_c/\Phi_z : \Phi_z/\Phi_z : \Phi_k/\Phi_z = 1 : 1 : 1,$$

в логарифмическом выражении:

$$100 \lg \frac{N_3}{N_c} : 100 \lg \frac{N_3}{N_3} : 100 \lg \frac{N_3}{N_k} = 0 : 0 : 0.$$

При невыполнении этого соотношения вводится градуировочная формула прибора, которая в общем виде в логарифмическом выражении такова:

$$\left(100 \lg \frac{N_{3. \text{ гр}}}{N_{c. \text{ гр}}} \right) - 0 - \left(100 \lg \frac{N_{3. \text{ гр}}}{N_{k. \text{ гр}}} \right),$$

где первое выражение в скобках — поправка значения формулы цветности для синей зоны, второе выражение в скобках — поправка значения формулы цветности для красной зоны. Установив между коллиматором и измерительным устройством контролируемый объектив, снимают отсчеты по регистрирующему прибору $N_{c. \text{ об}}$, $N_{3. \text{ об}}$, $N_{k. \text{ об}}$ и определяют формулу цветности с учетом градуировки прибора:

$$\left[100 \lg \frac{N_{3. \text{ об}}}{N_{c. \text{ об}}} - 100 \lg \frac{N_{3. \text{ гр}}}{N_{c. \text{ гр}}} \right] - 0 - \\ - \left[100 \lg \frac{N_{3. \text{ об}}}{N_{k. \text{ об}}} - 100 \lg \frac{N_{3. \text{ гр}}}{N_{k. \text{ гр}}} \right].$$

Экспериментальная погрешность измерений эффективного светопропускания составляет $\pm 1\%$; расчетная погрешность измерений — 0,4 логарифмической единицы для каждого числа формулы цветности.

ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

1. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Реальная оптическая система создает изображение предмета с определенными искажениями. Отличия изображения от предмета возникают вследствие аберраций оптической системы, дифракционных явлений, дефектов изготовления и других факторов [13, 16].

Характеристикой качества изображения служат аберрации различных видов в зависимости от поставленной задачи. Оптические системы с большими аберрациями характеризуют, как правило, геометрическими аберрациями, а для систем с малыми аберрациями оказывается более удобным использование волновых аберраций [3, 4].

Геометрической аберрацией называется отклонение значений координат лучей, вычисленных для реальной системы, от значений координат тех же лучей, вычисленных для идеальной системы. Геометрические аберрации делят на монохроматические, которые возникают при прохождении через систему лучей света одной длины волны, и хроматические, возникающие при прохождении через систему лучей с различными длинами волн (белый свет).

К монохроматическим аберрациям относятся сферическая аберрация (продольная и поперечная), кома, астигматизм, кривизна поля и дисторсия; к хроматическим — хроматизм положения и хроматизм увеличения.

Волновой аберрацией оптической системы называется отклонение реального волнового фронта от поверхности сравнения: сферы для фотографических объективов, объективов телескопов и других объективов; плоскости для телескопических систем.

Волновая аберрация выражается в единицах длин волн. Если волновая аберрация меньше или равна $0,1\lambda$, то изображение точки можно считать идеальным. Если волновая аберрация равна $0,25\lambda$, то изображение считают хорошим. Указанные пределы определены английским физиком Рэлеем и получили название критериев Рэлея.

Аберрации измеряют в реальных оптических системах для определения соответствия их расчетным данным и для установления влияния каждой аберрации на качество изображения. В зависимости от назначения оптической системы аберрации измеряют в угловой мере (в основном для зрительных труб и прожекторных зеркал) или в линейной (в фотографической оптике). Волновые абер-

рации измеряют в астрономической и микроскопической оптике, для спектральных призм и т. п.

Аберрации вместе с неизбежными погрешностями изготовления оптических деталей и сборки оптических систем снижают качество изображения.

Характеристики качества изображения зависят от требований, предъявляемых к оптической системе прибора. Например, оптические системы астрономических приборов, имеющих небольшое поле и изображающих в основном бесконечно удаленные предметы, должны быть рассчитаны с минимальными аберрациями. Изображение, создаваемое такими системами, искажается вследствие дифракции. Качество изображения оптических систем, применяемых с различными приемниками (глаз, фотоматериал, электронно-лучевые трубки, электронно-оптические преобразователи) и создающих изображение с большим полем, которое затем рассматривают визуально (визуальные, проекционные, фотографические, телевизионные и другие устройства), характеризуется резкостью, степенью соответствия геометрического подобия и подробностей структуры различных предметов и их изображений, а также контрастом. Оптические системы, используемые в оптико-электронных приборах для передачи световой энергии в целях дальнейшего преобразования ее в электрические сигналы, характеризуются количеством световой энергии и ее распределением в изображении элементарных объектов (светящейся точки, линии).

На основании изложенного критерии оценки качества оптического изображения для различных систем выбирают в зависимости от выполняемых ими задач. Критериями оценки качества оптического изображения, адекватными перечисленным характеристикам, являются функция рассеяния, пограничная кривая и оптическая передаточная функция. Все три критерия взаимнообратимы, взаимосвязаны и взаимозаменяемы, но не одинаково удобны при использовании для оценки качества изображения различных оптических систем [9].

Эти критерии могут быть получены из математического уравнения процесса образования оптической системой изображения, показывающего зависимость между распределением освещенности $E(x', y')$ в изображении и распределением яркости $L(x, y)$ в предмете. Если предмет рассматривать как совокупность светящихся точек, то уравнение процесса образования изображения при некогерентном излучении предмета будет иметь вид

$$E(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x' - x^*, x' - y^*) L(x, y) dx dy. \quad (84)$$

Изменение распределения освещенности в плоскости изображения в указанном случае обуславливается передающими свойствами оптической системы, которые характеризуются качеством изображения бесконечно удаленной светящейся точки (при усло-

вии соблюдения изопланатичности оптической системы). Функция $A(x' - x^*, y' - y^*)$ есть функция распределения освещенности в изображении любой светящейся точки бесконечно удаленного предмета с координатами x, y , называемая функцией рассеяния оптической системы. Текущие координаты x^*, y^* точки в плоскости изображения определяют по формулам $x^* = \beta x, y^* = \beta y$, где β — линейное увеличение оптической системы. Уравнение (84) представляет собой свертку функций A и L , поэтому его можно выразить через преобразование Фурье. Тогда уравнение процесса образования изображения можно записать так:

$$\tilde{E}(N'_x, N'_y) = \tilde{A}(N'_x, N'_y) \tilde{L}(N_x, N_y), \quad (85)$$

где $\tilde{E}(N'_x, N'_y)$, $\tilde{A}(N'_x, N'_y)$ и $\tilde{L}(N_x, N_y)$ — преобразования Фурье функций соответственно распределения освещенности в изображении $E(x', y')$, рассеяния оптической системы $A(x', y')$ и распределения яркости $L(x, y)$ в предмете; N'_x и N'_y — пространственные частоты, равные обратному значению периода синусоидального изменения освещенности в пространстве изображения по двум взаимно перпендикулярным направлениям; N_x и N_y — пространственные частоты, равные обратному значению периода синусоидального изменения яркости в плоскости предмета по тем же направлениям.

Пространственные частоты в плоскости предмета и в плоскости изображения связаны зависимостью $N' = \beta N$.

Уравнение (85) выражает процесс образования изображения в пространственно-частотном представлении.

Рассмотрим каждый из критериев отдельно и определим их связь с характеристиками качества изображения, создаваемого оптической системой.

ФУНКЦИЯ РАССЕЯНИЯ

Функция рассеяния $A(x', y')$ — это распределение освещенности в изображении бесконечно удаленной светящейся точки в плоскости наилучшего изображения, представляющее собой дифракционную картину. Математическое выражение функции рассеяния $A(x', y')$ для безабберационной оптической системы имеет вид

$$A(x', y') = \left[\frac{2J_1(z_1)}{z_1} \right]^2.$$

Здесь $J_1(z_1)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка; аргумент

$$z_1 = \frac{\pi D}{\lambda f' \sigma},$$

где D — диаметр входного зрачка оптической системы; f' — фокусное расстояние; λ — длина волны; $\sigma = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}$ — рас-

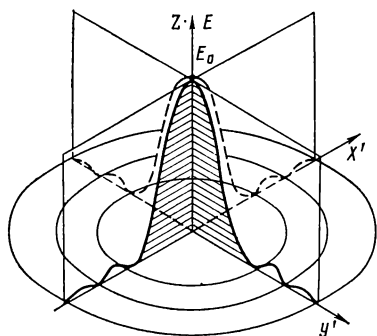


Рис. 129. Графическое представление функции рассеяния точки

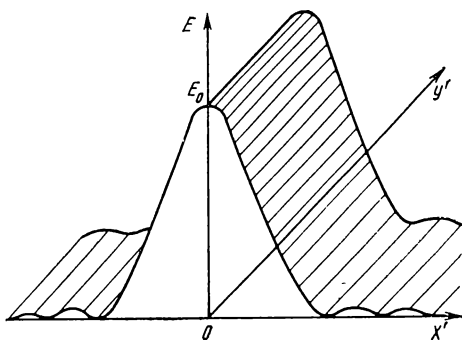


Рис. 130. Графическое представление функции рассеяния линии

стояние от центра пятна рассеяния; x' , y' — текущие координаты в плоскости изображения.

Графическое представление функции рассеяния для безаберрационной системы показано на рис. 129. В центральном кружке содержится (приблизительно) 84 % световой энергии всего пятна рассеяния. Этот кружок принимают за изображение точки. Светлые кольца, окружающие его, содержат 16 % световой энергии и создают фон изображения.

В реальных оптических системах при наличии остаточных аберраций происходит перераспределение световой энергии между центральным кружком и светлыми кольцами. Особенно сложной дифракционная картина получается в изображении внеосевой точки поля. Поэтому за критерий оценки качества изображения оптических систем с небольшим полем и для исследований по центру поля принимают функцию рассеяния.

Понятие функции рассеяния распространяют и на распределение освещенности в изображении светящейся линии. Функция $A_{\text{л}}(x', y')$ (рис. 130) рассеяния линии есть результат интегрирования функции $A(x', y')$ рассеяния точки по некоторому направлению, например y . Тогда

$$A_{\text{л}}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x', y' - y) dy.$$

По виду функции рассеяния определяют наличие аберраций и дефекты изготовления и сборки деталей оптической системы.

Для производственного контроля оптических систем по функции рассеяния используют различные числовые критерии: размер центрального кружка пятна рассеяния, диаметр пятна рассеяния с определенным содержанием световой энергии, количество которой устанавливается в зависимости от требований, предъявляемых к оптической системе; коэффициент Штреля (определятельная

яркость) — процентное отношение освещенности в центре пятна рассеяния данной системы к освещенности в центре пятна рассеяния идеальной оптической системы с теми же параметрами.

ПОГРАНИЧНАЯ КРИВАЯ

Кривая распределения освещенности в изображении пограничного теста $E_{\Pi}(x')$ называется пограничной кривой. Эта кривая характеризует распределение освещенности в изображении объекта, представляющего собой границу светового и темного поля. Такой объект называют пограничным тестом. Распределение яркости $L_{\Pi}(x)$ в нем описывается функцией скачка (рис. 131, а), которая является одномерной функцией. Для контраста, равного единице,

$$L_{\Pi}(x) = \begin{cases} L_{\max} = 1 & \text{при } x \leq x_0; \\ L_{\min} = 0 & \text{при } x > x_0. \end{cases}$$

Математическое выражение пограничной кривой

$$E_{\Pi}(x') = \int_0^{\infty} A_{\Pi}(x' - x) dx. \quad (86)$$

Связь между пограничной кривой $E_{\Pi}(x')$ и функцией $A_{\Pi}(x')$ рассеяния линии можно определить по формуле (86):

$$A_{\Pi}(x') = \frac{dE_{\Pi}(x')}{dx'}.$$

Графическое представление пограничной кривой изображено на рис. 131, б.

График пограничной кривой наглядно свидетельствует о понижении резкости изображения, которая является одним из основных признаков качества визуального изображения. Наклон пограничной кривой зависит от размера пятна рассеяния. Чем меньше крутизна пограничной кривой, тем больше размер пятна рассеяния и тем хуже резкость изображения. Следовательно, угол наклона пограничной кривой характеризует качество изображения

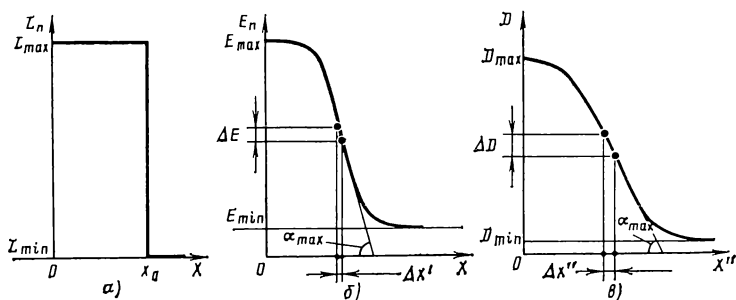


Рис. 131. Графическое представление пограничной кривой:

а — распределение яркости в пограничном тест-объекте; б — распределение освещенности в изображении пограничного тест-объекта; в — фотографическая пограничная кривая

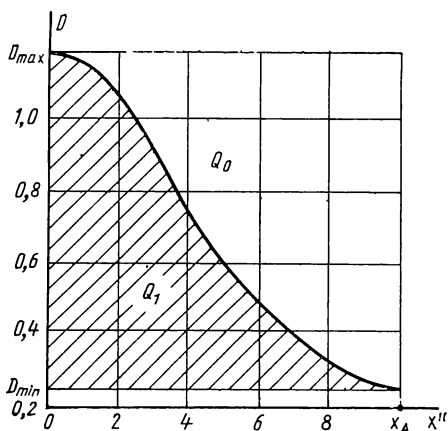


Рис. 132. Определение пограничной нерезкости

координат x'' в плоскости фотопленки (рис. 131, в).

Объективно качество изображения можно количественно оценить по пограничной кривой с помощью числовых критериев, приведенных ниже.

Пограничный градиент G_{\max} — тангенс угла α_{\max} наклона касательной в средней точке пограничной кривой к оси абсцисс (см. рис. 131, б), характеризующий резкость изображения, или $G_{\phi \max}$ — то же для фотографической пограничной кривой (рис. 131, в):

$$G_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_{\max} = \Delta E / \Delta x'; \quad G_{\phi \max} = \Delta D / \Delta x'',$$

где ΔE — приращение освещенности оптического изображения пограничного теста; ΔD — приращение плотности D почернения фотографического изображения пограничного теста; $\Delta x'$ и $\Delta x''$ — интервалы на оси абсцисс.

Критерий p , учитывающий перепад максимальной и минимальной освещенности, или критерий p_{ϕ} плотности почернения фотопленки, характеризующий резкость и контраст изображения:

$$p = (E_{\max} - E_{\min}) G_{\max}; \quad p_{\phi} = (D_{\max} - D_{\min}) G_{\phi \max}.$$

Пограничная нерезкость S — отношение площади Q_1 , ограниченной фотографической пограничной кривой $D(x'')$, к площади квадрата Q_0 , принятой за 100 % (рис. 132):

$$S = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{\int_A^B D(x) dx}{(D_{\max} - D_{\min})(x_A - x_B)}.$$

Пограничная кривая по сравнению с функцией рассеяния более удобна для оценки качества изображения при испытании оптических систем с большим полем, но менее удобна для оценки качества изображения при расчетах.

по резкости. Пограничную кривую как критерий оценки качества изображения используют для систем, создающих визуальное изображение с большим полем. Кроме того, ее можно применить для непосредственной оценки качества изображения сложных систем, состоящих из объектива и различных приемников. Например, кинофотоприборы можно проверить по фотографической пограничной кривой, т. е. получить зависимость плотности D почернения светочувствительного слоя от

ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ

В последнее время как основной критерий оценки качества сложных оптических систем (в том числе и объективов с большим полем), предназначенных для передачи информации, широкое распространение получила оптическая передаточная функция (ОПФ). Она служит мерой способности оптической системы воспроизводить различные пространственные частоты [10]. Любой предмет, изображаемый оптической системой, можно описать функцией распределения яркости $L(x, y)$, и эту функцию, согласно преобразованиям Фурье, можно разложить на отдельные синусоидальные составляющие с изменяющимися пространственными частотами, которые характеризуются амплитудой (интенсивностью света) и фазой (угловой ориентацией на плоскости), зависящими от пространственной частоты. Например, функцию распределения яркости в прямоугольной решетке (рис. 133) можно представить набором синусоид 1—4 с различными амплитудами и периодами. Изображая такой предмет, оптическая система передает каждую из составляющих с различными периодами p с искажениями по амплитуде a и фазе. Значение этих искажений можно выразить функциями от пространственной частоты $T(N_x, N_y)$ и $\phi(N_x, N_y)$. Они зависят от остаточных aberrаций, дифракционных явлений и погрешностей изготовления оптической системы, т. е. изменяются от тех факторов, которые определяют качество изображения.

Рассматривая уравнение процесса образования изображения в частотном представлении (85), можно определить эту меру искажений как отношение функций распределения освещенности в изображении к функции распределения яркости в предмете:

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = \frac{\tilde{E}(N'_x, N'_y)}{\tilde{L}(N_x, N_y)},$$

которая представляет собой ОПФ.

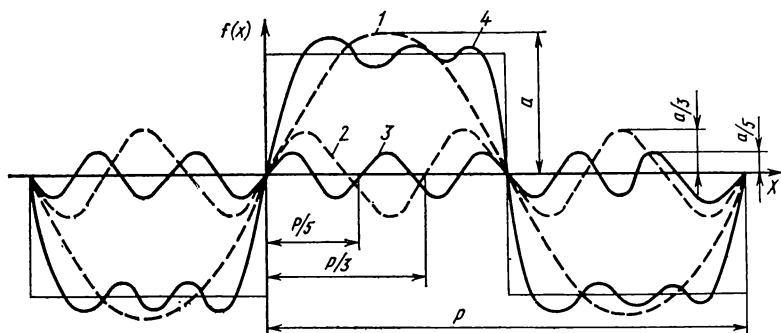


Рис. 133. Разложение в ряд Фурье функции распределения яркости в прямоугольной решетке

Таким образом, ОПФ в математическом выражении представляет собой преобразование Фурье функции рассеяния $A(x', y')$ оптической системы:

$$\text{ОПФ} = \tilde{A}(N'_x, N'_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x', y') e^{-i2\pi(N'_x x' + N'_y y')} dx dy. \quad (87)$$

Выражая функцию (87) через модуль и аргумент, получим

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = |\tilde{A}(N'_x, N'_y)| e^{i\varphi(N'_x, N'_y)} = T(N'_x; N'_y) e^{i\varphi(N'_x, N'_y)}.$$

Модуль оптической передаточной функции $T(N_x, N_y)$ показывает зависимость изменения амплитуды функции распределения освещенности в изображении от пространственной частоты, а изменение амплитуды в плоскости изображения пропорционально коэффициенту передачи контраста. Коэффициентом передачи контраста T_N называют отношение контраста изображения к контрасту предмета ($T_N = K_{\text{и}}/K_{\text{п}}$). Контраст для синусоидального предмета и его изображения определяют по формуле

$$K = \frac{J_{\text{max}} - J_{\text{min}}}{J_{\text{max}} + J_{\text{min}}}, \quad (88)$$

где J_{max} и J_{min} — максимальная и минимальная интенсивности света (яркость для плоскости предмета L_{max} , L_{min} ; освещенность в плоскости изображения E_{max} , E_{min}).

Модуль оптической передаточной функции называют частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), так как она показывает зависимость коэффициента передачи контраста от пространственной частоты, или пространственно-частотной характеристикой (ПЧХ), так как она рассматривается в двумерном пространстве, а также модуляционной передаточной функцией (МПФ) или функцией передачи модуляции (ФПМ) по аналогии с передачей электрических сигналов. Так как формула контраста (88) для синусоидального объекта аналогична формуле модуляции для электрических сигналов, коэффициент передачи контраста называют коэффициентом передачи модуляции (КПМ). Тогда ФПМ определяется как зависимость коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты.

Аргумент передаточной функции $\varphi(N'_x, N'_y)$ показывает зависимость фазы от пространственной частоты. Эту зависимость называют частотно-фазовой характеристикой или функцией передачи фазы (ФПФ).

Графические представления ФПМ и ФПФ для типового случая (рис. 134) показаны для одного направления в плоскости изображения, т. е. в направлении сканирования изображения. ФПМ (рис. 134, а) нормируется для нулевой пространственной частоты. При $N = 0$ ФПМ имеет максимальное значение, равное 1. Значение ФПФ (рис. 134, б) при $N = 0$ равно нулю. Максимальное значение изменения фазы равно 2π . Наличие ФПФ определяется несимметричностью функции рассеяния оптической системы, это

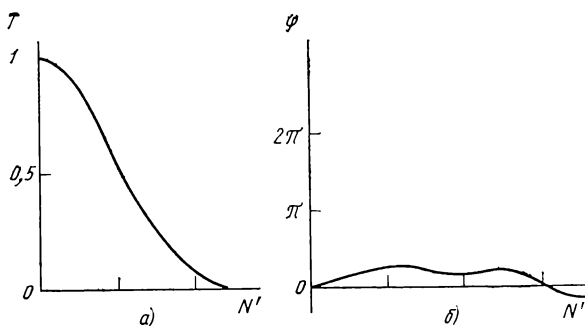


Рис. 134. Графическое представление:

а — ФПМ; б — ФПФ

указывает на несимметричные остаточные aberrации (кому). Если функция рассеяния симметрична, то нетрудно показать, используя формулу (87), что ФПФ при этом отсутствует и оптическая передаточная функция определится только ФПМ. Оптические системы высокого качества имеют незначительные фазовые изменения, поэтому, как правило, исследование проводят только по ФПМ, которая дает наиболее полную и объективную информацию об оптической системе.

ФПМ сложной системы, состоящей из отдельных линейных элементов, определяется как произведение ФПМ каждого элемента:

$$T_c(N'_x, N'_y) = \prod_{i=1}^n T_i(N'_x, N'_y), \quad (89)$$

что дает возможность комбинировать ФПМ отдельных линейных элементов, входящих в систему образования изображения.

При исследовании оптических систем по функции передачи модуляции для выделения того или иного параметра используют различные графические представления зависимости КПМ от пространственной частоты N' в одном направлении сканирования. Если исследования проводят в одной плоскости (в плоскости наилучшего изображения), то строят кривые зависимости в координатах T и N для различных относительных отверстий A_1, A_2, A_3 (рис. 135, а), для различных длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ (рис. 135, б), для центра и различных точек поля y_0, y_{10}, y_{20} (рис. 135, в) в меридиональном (сплошные кривые) и в сагиттальном (штриховые кривые) сечениях. ФПМ изображают в виде расфокусировочных кривых для различных пространственных частот в центре и по полю, в меридиональном и сагиттальном сечениях (рис. 135, г), что позволяет определить плоскость наилучшего изображения [7].

По ФПМ, измеренных для различных точек поля, спектральных областей, плоскостей изображения, определяют остаточные aberrации оптической системы: кривизну поля, хроматизм, астигматизм, сферическую aberrацию. Для производственного контроля

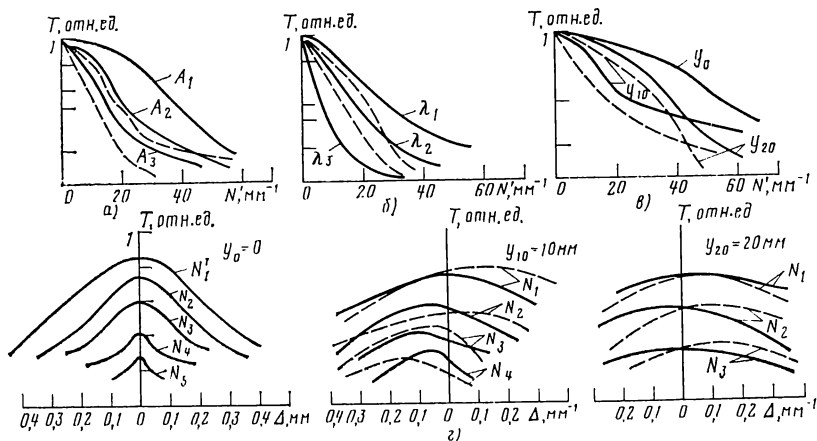


Рис. 135. Графическое представление ФПМ в различных координатах: а — для различных относительных отверстий; б — для длин волн; в — для точек поля; г — расфокусировочные кривые

качества изображения оптических систем по ФПМ используют числовые критерии.

Числовые критерии по ФПМ разрабатывают для оптических систем каждого типа. Например, для систем кинематографии предложена «критическая» пространственная частота, при которой коэффициент передачи модуляции уменьшается в e раз, т. е. при $T = 0,368$; для фотографических систем используют среднюю пространственную частоту в сюжетно важном интервале пространственных частот. Для малоформатных объективов, снимки от которых рассматривают визуально с расстояния наилучшего видения, этот интервал находится в пределах $0 \dots 40 \text{ мм}^{-1}$. Значения допустимых коэффициентов передачи модуляции при заданных частотах могут быть получены на стадии расчета оптических систем и, следовательно, установлены технические условия на реальные объективы, согласно которым осуществляется выбор числовых критериев оценки качества изображения.

Числовым критерием оценки качества изображения по ФПМ является и разрешающая способность, так как она представляет собой предельную пространственную частоту при минимальном коэффициенте передачи контраста. В качестве критерия качества изображения оптических систем разрешающую способность стали использовать с момента появления относительно сложных оптических приборов — телескопов. Этот критерий был предложен Рэлеем как обратная величина наименьшего расстояния между двумя различаемыми светящимися точками или линиями. Наименьшее разрешаемое расстояние ρ_0 для безабберационной оптической системы равно радиусу центрального кружка дифракционной картины изображения бесконечно удаленной светящейся точки или расстоянию между максимумами функций рассеяния двух све-

тящихся точек, когда максимум одной функции рассеяния совпадает с первым минимумом другой (рис. 136). Это расстояние $\rho_0 = 1,22\lambda f'/D$, где λ — длина волны света; f' и D — соответственно фокусное расстояние и диаметр входного зрачка объектива.

Разрешающая способность для одного направления функции рассеяния $N_0 = 1/\rho$.

Разрешающая способность определена по критерию Рэля из предположения визуального наблюдения для точки изображения, расположенной на оптической оси. Разрешающая способность N_Φ объектива и фотографического слоя (фотографическая разрешающая способность) может быть найдена по эмпирической формуле:

$$1/N_\Phi = 1/N_{об} + 1/N_c,$$

где $N_{об}$ — визуальная разрешающая способность объектива; N_c — разрешающая способность фотослоя.

Фотографическую разрешающую способность можно определить по ФПМ с помощью функции порогового контраста (ФПК) эмульсионного слоя пленки, которая показывает зависимость минимального контраста K_{min} , при котором еще наблюдается разрешение мира, от ее пространственной частоты (рис. 137, кривые 1 и 2).

ФПК пленки определяют по синусоидальным мирам, имеющим различный контраст. С достаточной для практических целей точностью ФПК пленки можно найти по прямоугольным мирам.

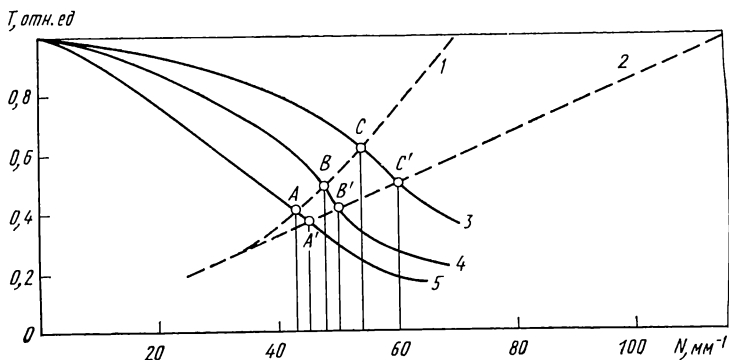


Рис. 137. Определение фотографической разрешающей способности объективов по ФПМ и ФПК:

1 — ФПК пленки фото-32; 2 — ФПК пленки КН-1; 3 — ФПМ объектива Юпитер-12; 4 — ФПМ объектива Гелиос-44; 5 — ФПМ объектива Индустар-50

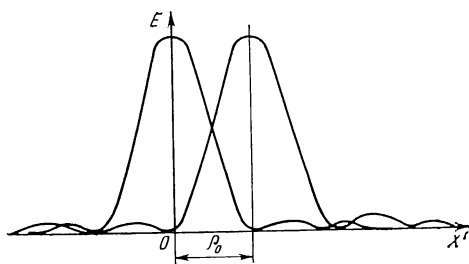


Рис. 136. График распределения освещенности при разрешении двух светящихся точек

Фотографическую разрешающую способность определяют абсциссой точки A или A' , B или B' , C или C' пересечения ФПМ объектива и ФПК пленки, с которой используется объектив (рис. 137).

Способ определения фотографической разрешающей способности по ФПМ исключает субъективность измерения и может быть автоматизирован.

Оценка качества изображения оптических систем, используемых в приборах для воспроизведения визуального изображения, по числовым критериям не дает полного представления о их передающих свойствах и применяется в основном для контроля годности продукции. По виду кривой ФПМ, дающей наиболее полную информацию о качестве изображения в рабочем диапазоне пространственных частот, проводят исследования оптических систем на стадии разработки.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ

Измерение остаточных aberrаций скорректированных оптических систем (фотографических объективов, объективов зрительных труб, элементов оборачивающих систем и др.) выполняют в целях выявления соответствия реальных aberrаций их теоретическим значениям, на основании чего судят о возможности использования контролируемого объектива по прямому назначению. Так, если измеренная дисторсия аэрофотосъемочного объектива окажется большой, то объектив нельзя использовать для точных топографических работ, например составления карты местности. В этом случае необходимо выявить возможные нарушения технологического процесса изготовления объектива или другие причины несоответствия измеренных aberrаций допустимым значениям.

ИЗМЕРЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ОБЪЕКТИВОВ

Сферическая aberrация может быть измерена методом, основанным на определении координат точек пересечения с задней фокальной плоскостью лучей, прошедших через отдельные зоны контролируемого объектива (рис. 138, а). Он позволяет измерить продольную и поперечную сферическую aberrацию объектива и его вторичный спектр.

Прямоугольная щель 3 установлена в заднем фокусе F'_k объектива 4 коллиматора и освещается источником света 1 через конденсор 2 и сменный светофильтр С. За объективом 4 установлены две щелевые диафрагмы 5, представляющие собой два прямоугольных отверстия в непрозрачном экране. Принято выбирать ширину b каждого отверстия равной $1/100$ фокусного расстояния контролируемого объектива; высоту $h = 3b$ и расстояние между отверстиями $d = 2b$. Диафрагмы 5 устанавливают на подвижные каретки так, чтобы длинная сторона каждой щели была параллельна длинной стороне щели 3. Диафрагмы 5 называют также подвижными диа-

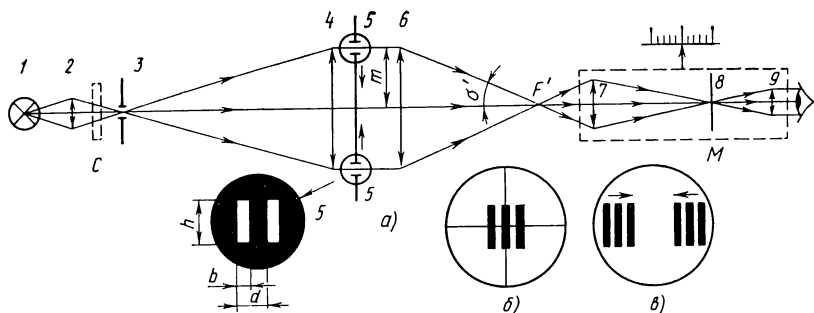


Рис. 138. Измерение сферической аберрации объектива:

а — схема измерения; *б* — вид поля изображения микроскопа при измерении поперечной сферической аберрации; *в* — то же, при измерении продольной сферической аберрации

фрагментами. За исследуемым объективом *б* на отсчетной каретке устанавливают микроскоп *М*, который содержит объектив *7* и сетку *8*. Окуляр *9* микроскопа, как правило, служит окуляр-микрометр.

Диафрагма *5* выделяет из параллельного пучка лучей, идущих из коллиматора, узкий пучок в зоне *т*. В фокальной плоскости объектива *6* формируется дифракционное изображение щели *3*, представляющее собой характерную картину, так называемый «тройник» (рис. 138, *б*), состоящий из трех линий (на рисунке изображены темными), расположенных параллельно длинным сторонам щелевых диафрагм *3* и *5*. Если диафрагму *5* перемещать перпендикулярно к оптической оси, т. е. открывать различные зоны *т* объектива, то при отсутствии сферической аберрации тройник будет неподвижным, в противном случае смещение тройника зависит от положения диафрагмы *5*, т. е. от значения *т*. Предметная точка микроскопа *М* совмещена с задним фокусом *F'* объектива *6*.

При измерении поперечной сферической аберрации $\Delta y'$ используется только одна диафрагма *5*, а значение *l* смещения тройника измеряется с помощью окуляра-микрометра путем наведения перекрестия на центральную светлую линию тройника. Очевидно, что $l = \Delta y' \beta$, где β — линейное увеличение микрообъектива *7*. Так как значение β входит в результаты измерения, его следует измерить заранее; в лабораторной практике используют аттестованный микрообъектив, линейное увеличение которого измерено с высокой точностью. В результате измерений значения *l* для нескольких зон объектива получают зависимость $l = f(m)$ в виде табличных данных, с помощью которых строят кривую поперечной сферической аберрации в общепринятом виде: $\Delta y' = f(\operatorname{tg} \sigma')$, где $\operatorname{tg} \sigma' = m/f'$ (f' — фокусное расстояние контролируемого объектива).

Наиболее ответственной операцией при измерении поперечной сферической аберрации является наведение нити окуляра-микро-

метра на середину светлой линии тройника, который представляет собой дифракционное изображение щели 3, построенное двумя отверстиями шириной b с расстоянием между ними $d = 2b$. В этом случае расстояние от центра главного максимума нулевого порядка до первого минимума определяется в угловой мере выражением $\sin \varphi = \lambda/(2d)$, где λ — длина волны света. Если $b = 0,01f'$, то $\sin \varphi = 25\lambda/f'$. Линейное расстояние от центра изображения до первого минимума $f' \sin \varphi = 25\lambda$, а ширина всего изображения равна 50λ , или $0,025$ мм.

Если принять, что визуально изображение можно разделить нитью на две равные части с погрешностью до $1/5$ его ширины, то погрешность наведения составит $0,005$ мм. Это и есть главная погрешность при измерении поперечной сферической аберрации. С учетом других погрешностей на практике принято считать, что суммарная погрешность измерения поперечной аберрации составляет $0,01 \dots 0,015$ мм независимо от значения самой аберрации.

При измерении продольной сферической аберрации используют обе диафрагмы 5, устанавливая их на симметричных зонах относительно оси объектива 6. При наличии сферической аберрации в поле изображения микроскопа видны два тройника (рис. 138, в). Микроскоп M перемещают вдоль оси до тех пор, пока оба тройника не сольются в один. Очевидно, что в этом случае предметная плоскость микроскопа проходит через точку пересечения лучей (точнее — узких пучков лучей), идущих через зоны m контролируемого объектива. Если в первоначальном положении микроскопа его предметная плоскость была совмещена с параксиальным фокусом объектива, то значение перемещения микроскопа для различных зон есть не что иное, как продольная сферическая аберрация объектива.

Началом отсчета положения микроскопа не обязательно должна быть именно задняя фокальная плоскость, проходящая через параксиальный фокус объектива. При обработке результатов измерения сравнительно просто строят кривую продольной (или поперечной) сферической аберрации для любой другой плоскости установки известными приемами.

Так как при измерении продольной сферической аберрации используется продольная наводка, чувствительность которой ниже, чем у поперечной наводки, то в сопоставимых условиях измерение поперечной аберрации оказывается точнее, чем продольной.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСТОРСИИ ОБЪЕКТИВОВ

Дисторсия нарушает подобие между предметом и изображением. Для аэрофотосъемочных объективов, используемых для составления карт местности по снимкам, эта аберрация особенно вредна. В тех случаях, когда широкоугольный объектив используют в измерительных целях, дисторсия объектива не должна превышать допустимых, заранее определенных значений. Поэтому результаты измерения дисторсии объектива служат

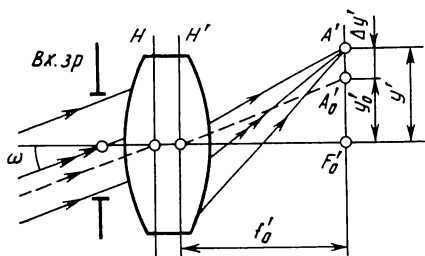


Рис. 139. Ход лучей в объективе при дисторсии

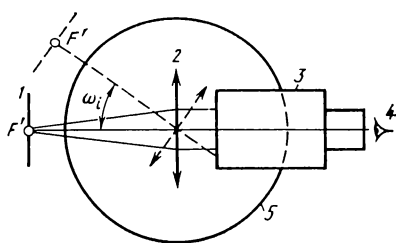


Рис. 140. Схема измерения дисторсии объектива гониометрическим методом

основанием для принятия решения о возможности его применения по основному назначению.

Дисторсию объектива иногда называют аберрацией главного луча. Если на входной зрачок объектива (рис. 139) под углом ω к его оси падает параллельный пучок лучей, то после объектива, имеющего только одну аберрацию — дисторсию, пучок лучей останется гомоцентрическим и построит изображение A' некоторой удаленной точки. В этой же ситуации идеальный объектив построит изображение A'_0 той же самой точки. Вследствие дисторсии главный луч, идущий через центр входного зрачка, «привел» пучок не в точку A'_0 , а в точку A' . Положение точки A'_0 определено ходом луча, проходящего через главные точки объектива (HH' — главные плоскости, F'_0 — задний параксиальный фокус объектива). Отрезок $\Delta y' = y' - y'_0 = y' - f'_0 \operatorname{tg} \omega$ называется дисторсией объектива, выраженной в линейной мере.

Дисторсия может быть выражена в относительных единицах (процентах):

$$\Delta' = \frac{y' - y'_0}{y'_0} 100.$$

Различают дисторсию *оптическую* и *фотограмметрическую*. Если при вычислении дисторсии используют параксиальное фокусное расстояние f'_0 объектива, то это дисторсия оптическая. Можно найти такое положение плоскости изображения, при котором дисторсия имеет минимальное значение по всему полю изображения. Плоскость, для которой нарушение подобия между предметом и изображением оказывается минимальным, находится от задней главной плоскости H' на некотором расстоянии $f' \neq f'_0$. Дисторсия, вычисленная или измеренная в этой плоскости, называется фотограмметрической дисторсией.

Оптическую дисторсию можно измерять гониометрическим методом (рис. 140), используя гониометр в качестве основного измерительного инструмента. Контролируемый объектив 2 устанавливают на столик 5 гониометра. В фокальной плоскости объектива расположена стеклянная линейка 1 с рядом вертикальных штрихов, расстояние между которыми известно с высокой точностью.

Автоколлимационная зрительная труба 3 и глаз 4 наблюдателя расположены за объективом 2 согласно ходу лучей.

Измерительное устройство для обеспечения достоверных измерений должно удовлетворять следующим требованиям.

1. Ось вращения столика гониометра должна быть перпендикулярна к оси зрительной трубы. Проверку этого требования выполняют с помощью плоскопараллельной пластины по общепринятой методике настройки гониометра.

2. Опорный торец объективодержателя и плоскость линейки должны быть перпендикулярны к оси зрительной трубы. Проверку выполняют по совмещению автоколлимационного изображения перекрестия зрительной трубы с самим перекрестием при отражении лучей света от плоскости линейки и от юстировочной плоскопараллельной пластины, прижатой к опорному торцу объективодержателя.

3. Плоскость входного зрачка контролируемого объектива должна быть совмещена с осью вращения столика гониометра. Для проверки выполнения этого требования на объективе зрительной трубы закрепляют дополнительную линзу (так называемую линзу-приблизитель), передний фокус которой расположен вблизи оси вращения столика. В этом случае линза и зрительная труба эквивалентны по оптическому действию микроскопу с большим рабочим расстоянием.

Наблюдая в окуляр зрительной трубы входной зрачок контролируемого объектива и поворачивая столик гониометра вокруг оси вращения, продольным перемещением объективодержателя добиваются такого положения объектива, при котором изображение его входного зрачка будет неподвижным.

4. Рабочая плоскость линейки должна быть расположена в задней фокальной плоскости контролируемого объектива. Это обеспечивается перемещением линейки вдоль оси объектива до получения резкого изображения штрихов шкалы при наблюдении в зрительную трубу.

5. Изображение нулевого штриха линейки должно быть совмещено с визирной осью зрительной трубы. Для выполнения этого требования линейку двигают перпендикулярно к оптической оси до совмещения изображения нулевого штриха с перекрестием зрительной трубы, при этом столик гониометра должен иметь нулевой отсчет по лимбу.

Процесс измерений заключается в следующем. Поворачивая столик гониометра с объективом 2 и линейкой 1 (см. рис. 140), совмещают, наблюдая в зрительную трубу, изображения штрихов линейки с перекрестием зрительной трубы. Столик поворачивают в обе стороны от нулевого штриха линейки. Каждый угол ω_i получают как среднее значение углов $+\omega_i$ и $-\omega_i$, измеренных при наведении перекрестия трубы на симметричные штрихи линейки относительно нулевого штриха. Результаты измерений заносят в таблицу, в которой каждому расстоянию y'_i штриха линейки

от нулевого штриха будет соответствовать измеренное значение угла ω_i и значение дисторсии $\Delta y'_i$, вычисленное по формуле

$$\Delta y'_i = y'_i - f'_0 \operatorname{tg} \omega_i,$$

где f'_0 — параксиальное фокусное расстояние объектива.

Для нахождения f'_0 по результатам измерений вычисляют значения $f'_i = y'_i \operatorname{ctg} \omega_i$ для различных углов ω_i . Затем строят кривую зависимости f'_i от ω_i , экстраполируют ее на ось f'_i и находят значение f'_0 . После этого вычисляют значения $f'_0 \operatorname{tg} \omega_i$ и $\Delta y'_i$ для выбранных значений углов ω_i .

Точность метода можно оценить, продифференцировав формулу дисторсии и положив, что погрешность измерения расстояний между штрихами линейки пренебрежимо мала:

$$d(\Delta y'_i) = -df'_0 \operatorname{tg} \omega_i - f'_0 \frac{d\omega_i}{\cos^2 \omega_i}.$$

Для нахождения df'_0 определим

$$f'_0 = \lim_{\omega_i \rightarrow 0} \frac{y'_i}{\operatorname{tg} \omega_i} \approx \frac{y'_1}{\operatorname{tg} \omega_1},$$

где y'_1 и ω_1 относятся к небольшим углам поля.

В этом случае

$$df'_0 \approx -\frac{y'_1}{\sin^2 \omega_1} d\omega_1.$$

Подставив полученное значение df'_0 в формулу для определения точности измерения дисторсии, получим

$$d(\Delta y'_i) \approx \frac{y'_i \operatorname{tg} \omega_i}{\sin^2 \omega_1} d\omega_1 - \frac{f'_0 d\omega_i}{\cos^2 \omega_i}.$$

Эту формулу можно использовать для анализа точности измерений в общем случае. Из практического опыта установлено, что наибольшую погрешность в окончательный результат вносят погрешности измерения углов ω_i , так как погрешность измерения фокусного расстояния можно учесть как систематическую при обработке результатов измерений. Поэтому точность измерения дисторсии можно оценить по формуле

$$d(\Delta y'_i) \approx f'_0 \frac{d\omega_i}{\cos^2 \omega_i}.$$

Приняв, например, $f'_0 = 750$ мм, $\omega_i = 30^\circ$, $d\omega_i = 2'' = 10^{-5}$, найдем $d(\Delta y'_i) = 0,01$ мм.

Достигаемая на практике погрешность измерения дисторсии при хорошем качестве изображения контролируемого объектива не превышает 0,01 ... 0,02 мм.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ОБЪЕКТИВОВ И ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Результаты измерения волновой аберрации позволяют судить о качестве контролируемой системы более полно, чем результаты измерения геометрических аберраций (сферической,

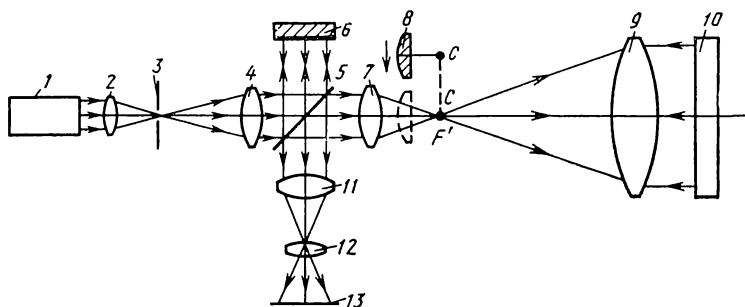


Рис. 141. Схема интерферометра для измерения волновых aberrаций объективов и телескопических систем

дисторсии), так как дают прямой ответ о форме волнового фронта, созданного контролируемой системой.

Измерение волновых aberrаций объективов и телескопических систем чаще всего выполняют на интерферометре Тваймана — Грина и его модификациях. Применение лазеров в интерферометрах в качестве источников света позволило значительно улучшить характеристики и существенно уменьшить габаритные размеры интерферометров. Наибольшее применение нашли гелий-неоновые лазеры с длиной волны излучения $\lambda = 632,8$ нм.

При контроле объективов и телескопических систем используют интерферометр с разделительной пластиной (рис. 141). Лучи света, идущие от монохроматического источника 1, фокусируются конденсором 2 и освещают точечную диафрагму 3, установленную в фокусе объектива 4. Лучи, выходящие из объектива 4, образуют плоский волновой фронт, т. е. параллельный пучок. Полупрозрачная пластина 5 делит пучок на два пучка, один из которых идет к эталонному плоскому зеркалу 6, а другой — к контролируемому объективу 7. Если этот объектив имеет высокое качество и падающий пучок параллелен его оптической оси, то все выходящие из него лучи соберутся в его фокусе F' , с которым совмещен центр кривизны C сферического зеркала 8. Очевидно, что после отражения от зеркала 8 лучи пойдут в обратном направлении и встретятся с лучами, отраженным от зеркала 6.

Таким образом, в фокальной плоскости объектива 11 образуются два точечных источника света, которые являются оптическими изображениями точечной диафрагмы 3. Эти изображения построены раздельно эталонной ветвью интерферометра (зеркало 6) и рабочей (контролируемый объектив 7 и сферическое зеркало 8). Взаимное положение когерентных источников можно менять, наклонив, например, зеркало 6 в нужном направлении, или сместить зеркало 8 вдоль или поперек оптической оси объектива 7.

Для наблюдения интерференционной картины зрачок 12 глаза экспериментатора совмещают с фокальной плоскостью объектива 11. В этом случае роль экрана 13 выполняет сетчатка глаза, на

которой одновременно, благодаря аккомодации глаза, строится изображение входного зрачка объектива 7 и возникает интерференционная картина. Очевидно, что если объектив 7 не имеет аберраций, то выходящий из него волновой фронт имеет строго сферическую форму. После отражения от зеркала 8 и вторичного прохождения через контролируемый объектив вновь образуется плоский волновой фронт. В этом можно убедиться, если интерференционную картину вывести на полосы, наклонив зеркало 6. При пересечении двух плоских волновых фронтов, идущих из обеих ветвей интерферометра, образуются прямолинейные интерференционные полосы. Отклонение от прямолинейности этих полос и служит критерием качества объектива.

Для получения контрастной интерференционной картины при использовании обычных источников света (например, газоразрядных ламп) необходимо обеспечить равенство оптических путей в обеих ветвях интерферометра путем перемещения зеркала 6. Вид интерференционной картины зависит от настройки прибора. Для получения интерференционной картины в виде колец необходимо центр S сферического зеркала 8 вывести на ось объектива 7, а зеркало 6 установить перпендикулярно к падающему на него пучку лучей. Для этого после объектива 11 устанавливают окуляр, преобразующий наблюдательную ветвь интерферометра в зрительную трубу, в поле которой видны два изображения диафрагмы 3. Если эти изображения наложены одно на другое, то после выключения окуляра наблюдается интерференционная картина в виде колец; если изображения диафрагмы 3 сдвинуты одно относительно другого, то интерференционная картина имеет вид полос. Пользуясь юстировочными движениями зеркал 8 и 6, интерференционную картину в начале измерений выводят на кольца. Однако для оценки качества объектива надо знать расположение центра S сферического зеркала 8 относительно параксиального фокуса контролируемого объектива. Для этого зеркало 8 плавно перемещают вдоль оси объектива 7, наблюдая при этом интерференционную картину в виде колец. Освещенность в центральной зоне меняется на противоположную всякий раз, когда зеркало 8 смещается на четверть длины волны света.

При приближении точки S к F' центральная зона интерференционной картины расширяется до тех пор, пока не достигнет максимального значения. Этот момент соответствует совмещению точек S и F' ; при перемещении зеркала в любую сторону от этого положения центральная зона интерференционной картины будет уменьшаться. Часто качество объектива оценивают именно в этом положении, определяя остаточные аберрации в фокальной плоскости объектива. Число колец и их распределение являются критериями качества объектива, аналогично оценке качества поверхностей пробным стеклом; в обоих случаях цена одной интерференционной полосы равна половине длины волны света.

Знак погрешности (бугор или яма) определяют по знаку волнового фронта, выходящего из рабочей ветви. Очевидно, что опережающему волновому фронту соответствует бугор, отстающему — яма на контролируемой поверхности. Для определения знака волнового фронта можно использовать следующий прием. Совмещают центр кривизны сферического зеркала 8 с задним фокусом объектива 7 и контролируют это совмещение по максимальному значению центральной зоны интерференционной картины. После этого смещают зеркало 8 в любую сторону вдоль оси объектива 7, например, удаляя зеркало от объектива. В этом случае из рабочей ветви интерферометра выйдет заведомо известный сходящийся пучок лучей, соответствующий вогнутому волновому фронту. Изменим разность хода лучей в ветвях интерферометра, надавливая на любое, но на одно и то же выбранное место в интерферометре, например, на его станину под зрительной трубой. При этом интерференционные кольца будут либо стягиваться к центру, либо разбегаться от него. Допустим, что имеет место первое явление, тогда нажатие на станину вызывает стягивание интерференционных колец для вогнутого волнового фронта. Таким образом, получаем простой практический прием для определения знака погрешностей: если при нажатии на станину интерференционные кольца стягиваются к центру, то это соответствует отстающему участку волнового фронта; если при нажатии на станину интерференционные кольца разбегаются, то это соответствует опережающему участку волнового фронта.

Отметим, что определив погрешности контролируемого объектива при данном положении сферического зеркала, всегда можно найти их расчетным путем для любой другой плоскости установки, аналогично тому, как находят волновые aberrации оптической системы в зависимости от положения сферы сравнения. Следовательно, по фотографии интерференционной картины, полученной при данном положении эталонного сферического зеркала, всегда можно определить остаточные aberrации объектива в плоскости наилучшей установки, что избавляет от необходимости экспериментального поиска этой плоскости. Этот очень важный, но мало известный в практике прием позволяет существенно уменьшить трудоемкость контроля, не снижая его достоверности.

Для оценки малых погрешностей интерференционную картину целесообразно вывести на полосы, так как при этом значительно повышается точность контроля. При визуальной оценке кривизны полос погрешность контроля не превышает $\sim 0,1$ ширины полосы.

По фотографии интерференционной картины и знакам экстремальных участков волнового фронта можно построить кривую волновой aberrации объектива (рис. 142), помня, что цена одного интерференционного кольца (полосы) равна половине длины волны света. Интерференционная картина представлена в стилизованном виде (тонкие линии соответствуют серединам кольцевых зон). Кольцам присвоены условные номера от 0 до 7. В сечении AA про-

водят через каждое кольцо перпендикуляр к AA до встречи с соответствующей линией графика волновой aberrации. Расстояния между параллельными линиями сетки соответствуют расстоянию $\lambda/2$. Остальные построения ясны из рисунка. В результате получают профиль сечения волнового фронта, или график волновой aberrации l как функции от m — высоты луча над оптической осью.

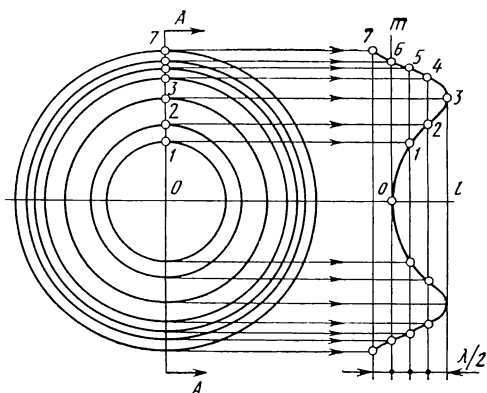


Рис. 142 Графическое определение волновой aberrации по интерференционной картине

В настоящее время эту работу выполняет ЭВМ по специально разработанным программам. Однако получение фотографии интерференционной картины, измерение диаметров колец (или координат полос), ввод полученных данных в ЭВМ остаются трудоемкими этапами работы, не позволяющими получить информацию в реальном времени. В этом отношении бесспорное преимущество имеют фотоэлектрические интерферометры, в которых интерференционная картина проецируется на матрицу фотоэлементов или приборов зарядовой связи и обрабатывается ЭВМ. Результаты обработки предоставляются экспериментатору в удобный для него форме (на экране дисплея или в виде карты волнового фронта, отпечатанной на бумажной ленте).

Для исследования объективов с большим входным зрачком и телескопических систем используют схему интерферометра, представленного на рис. 141. Вспомогательный объектив 7 устанавливают в рабочей ветви интерферометра. При контроле телескопических систем в качестве объектива 7 используют окуляр телескопической системы. Особенностью схемы является использование параллельного пучка лучей, выходящего из объектива 4, сравнительно малого диаметра (10 ... 20 мм). Поэтому световые диаметры элементов 4, 6, 7 и 11 также не превышают диаметра сечения параллельного пучка лучей. При исследовании объектива 9 с большим входным зрачком необходимо использовать высококачественный вспомогательный объектив 7, остаточные aberrации которого должны быть заранее определены. Возможен и другой вариант: после объектива 7 устанавливают положительный апланатический мениск, последняя поверхность которого служит эталонным сферическим зеркалом. В этом случае зеркало 6 выключают из хода лучей.

Объективы 7 и 9, установленные в рабочей ветви интерферометра, образуют телескопическую систему Кеплера. Если конструктивные параметры системы известны, то контрольным расче-

том на ЭВМ хода лучей определяют угловые aberrации для осевого параллельного пучка лучей, входящего в систему со стороны объектива 9. Для определения волновых aberrаций системы можно использовать формулу [14]

$$l = \int_0^y \sigma dy,$$

где l — волновая aberrация луча, выходящего из системы на высоте y под углом σ к оптической оси.

Так как лучи света дважды проходят через систему, при сравнении экспериментальных значений волновой aberrации с расчетными необходимо удвоить вычисленные значения волновой aberrации. Вычисление волновой aberrации по приведенной формуле удобно выполнять графоаналитическим способом.

Для получения интерференционной картины в виде полос необходимо наклонить одно из зеркал (6 или 10). Если, например, зеркало 10 наклонить на угол γ , то из рабочей ветви интерферометра выйдет волновой фронт, наклоненный к оптической оси, причем угол наклона w можно вычислить по формуле

$$w = 2\gamma\Gamma_T = 2\gamma f'_{об}/f'_{ок},$$

где Γ_T — угловое увеличение телескопической системы, образованной объективами 7 и 9; $f'_{об}$ — фокусное расстояние объектива 9; $f'_{ок}$ — фокусное расстояние объектива 7 (окуляра телескопической системы).

Ширина интерференционной полосы, соответствующая наклону волнового фронта на угол w ,

$$b = \lambda/w = \lambda/(2\gamma\Gamma_T),$$

где λ — длина волны света.

Найдем изменение Δb ширины интерференционной полосы, вызванное изменением $\Delta\gamma$ угла наклона зеркала:

$$\Delta b = \Delta\gamma\lambda/(2\gamma^2\Gamma_T).$$

Полученные формулы позволяют определить требования к юстировочным механизмам и к стабильности положения зеркала 10. Пусть, например, увеличение телескопической системы $\Gamma_T = 10$, $\lambda = 633$ нм, диаметр входного зрачка объектива 7 равен 20 мм. Если в интерференционном поле необходимо иметь пять полос, то $b = 4$ мм. Вычислим угол наклона зеркала к оптической оси:

$$\gamma = \lambda/(2b\Gamma_T) \approx 8 \cdot 10^{-6} = 1,6''.$$

Найдем относительное изменение ширины интерференционной полосы, вызванное изменением $\Delta\gamma$ угла наклона зеркала 10. Из приведенных формул следует:

$$\Delta b/b = \Delta\gamma/\gamma.$$

Таким образом, в рассматриваемом примере изменение интерференционной полосы на 0,1 ее ширины будет вызвано изменением

первоначального положения зеркала 10 на $0,16''$. Диаметр зеркала 10 должен быть не менее 200 мм, это означает, что край зеркала отклонился на $0,16$ мкм.

Рассмотрим влияние расфокусировки телескопической системы на деформацию волнового фронта, выходящего из рабочей ветви интерферометра. Пусть Δ_z — расстояние между фокусами объективов 7 и 9 , которые в идеальном случае должны быть совмещены. Тогда изображение фокуса объектива 7 , построенное лучами, вышедшими из расфокусированной системы, согласно формуле Ньютона будет располагаться на расстоянии R от заднего фокуса объектива 7 :

$$R = \frac{f'^2}{\Delta_z},$$

где f' — фокусное расстояние объектива 7 . Очевидно, что расстояние R равно радиусу волнового фронта, выходящего из рабочей ветви. Стрелка прогиба волнового фронта

$$l = \frac{D^2}{8R} = \frac{\Delta_z}{8} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{\Delta_z}{8} A^2,$$

где D — диаметр выходного зрачка системы; A — ее относительное отверстие.

Найдем значение расфокусировки Δ_z , вызывающей появление одного интерференционного кольца для данных примера, рассмотренного выше, положив, что $A = 0,2$ (относительное отверстие $1 : 5$). Так как разность хода, соответствующая одному интерференционному кольцу, равна длине волны света, то из последней формулы при $l = \lambda$ следует

$$\Delta_z = 8\lambda/A^2 = 0,125 \text{ мм.}$$

При отсутствии аберраций в телескопической системе радиусы колец пропорциональны квадратному корню из целых чисел. В реальных условиях деформации волнового фронта в основном обусловлены остаточными аберрациями контролируемой системы, поэтому наблюдение прямых интерференционных полос или колец практически невозможно. Однако приведенные формулы позволяют оценить влияние малых перемещений ответственных элементов интерферометра на состояние интерференционной картины, что необходимо учитывать при эксплуатации и разработке конструкций интерферометров.

3. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Для измерения разрешающей способности оптических систем используют штриховые или радиальные миры. Штриховые миры представляют собой стеклянные пластины с нанесенными на них темными штрихами на светлом фоне (рис. 143). В промышленности выпускают шесть номеров стандартных штриховых

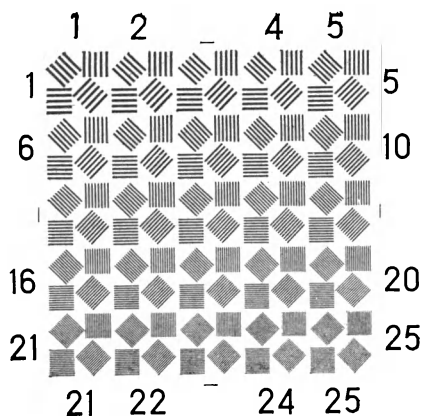


Рис. 143. Штриховая мира

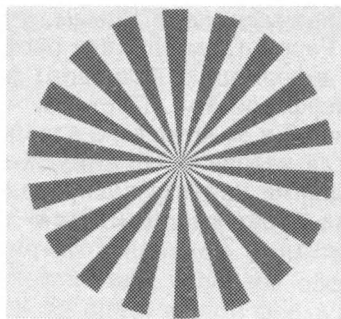


Рис. 144. Радиальная мира

мир, каждая из которых состоит из 25 элементов с цифровой характеристикой по краям. Один элемент состоит из четырех групп штрихов: с вертикальным, горизонтальным направлением и под углом 45° в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Ширина линии в каждой мире убывает от элемента к элементу по закону геометрической прогрессии со знаменателем $\frac{1}{\sqrt[13]{2}} \approx 0,94$.

Ширина линии, мм,

$$l = 2a,$$

где a — ширина светлого штриха.

Угловое расстояние ширины линии мира, "

$$\alpha = \frac{l}{f'} 206\,265,$$

где f' — фокусное расстояние объектива коллиматора, мм.

Число полос (линий) на один миллиметр для любого номера элемента данной мира

$$N_i = 60K_i/B,$$

где $i = 1; 2; 3 \dots 25$; B — база мира, мм, определяемая расстоянием между штриховыми отметками на мире. Вместо цифр 3, 11, 15 и 23, соответствующих номерам элементов мира, нанесены штриховые отметки. Мира имеет таблицу для расшифровки, в которой указаны значения разрешающей способности для каждого элемента.

Радиальные мира (рис. 144) представляют собой круг на стекле или фотобумаге, который разделен на 36 или 72 белых (прозрачных) и черных (непрозрачных) секторов. На любом радиусе ширина белых и черных секторов одинакова. И те и другие мира имеют абсолютный контраст $K = 1$. Практически прозрачность светлых штрихов или секторов должна быть больше прозрачности фона в 100 раз. Для специальных исследований применяют мира разного контраста.

Разрешающую способность измеряют визуальным и фотографическим способами. Визуальный способ используется для контроля отдельных объективов визуальных приборов, телескопических систем. Визуальную разрешающую способность при этом способе измеряют на оптической скамье с помощью зрительной трубы для телескопических систем (рис. 145, *а*) и с помощью микроскопа для отдельных объективов (рис. 145, *б*). В фокальной плоскости объектива 5 коллиматора помещают тест-объект 4 в виде штриховой или радиальной миры, освещаемой источником света 1 через конденсор 2 и матовое стекло 3. Изображение миры, спроецированное в плоскость наилучшего изображения контролируемой системы 6, рассматривают с помощью зрительной трубы 7 (рис. 145, *а*) или микроскопа 7 (рис. 145, *б*) и определяют номер элемента штриховой миры, разрешаемой по всем четырем направлениям, или максимальный размер кружка размытия радиальной миры.

Плоскость наилучшего изображения определяют перемещением зрительной трубы или микроскопа вдоль оптической оси до получения наиболее резкого изображения миры. Увеличение зрительной трубы выбирают из условия, позволяющего исключить влияние ограниченности разрешающей способности глаза наблюдателя на результаты измерений. Числовая апертура микроскопа должна быть больше апертуры испытываемого объектива или равна ей. Увеличение микроскопа рассчитывают так, чтобы угловой размер изображения двух разрешаемых штрихов миры находился в пределах $2 \dots 4'$, т. е. $\bar{\Gamma} = (2 \dots 4')/\psi'$, где ψ' — предполагаемая разрешающая способность контролируемого объектива в угловых величинах.

Перед измерениями коллиматор оптической скамьи должен быть выставлен на бесконечность и оптическая ось контролируемой

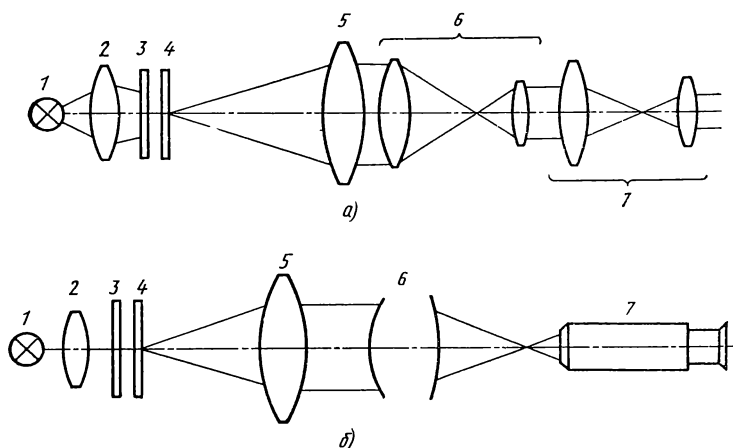


Рис. 145. Схемы устройства для измерения разрешающей способности: *а* — телескопических систем; *б* — микроскопа и фотографического объектива

системы (телескопической или объектива) совмещена с оптической осью коллиматора. Фокусное расстояние объектива коллиматора f_k должно быть в 3 ... 5 раз больше фокусного расстояния контролируемой системы.

Разрешающая способность системы, контролируемой по штриховой мере, мм^{-1} ,

$$N = \frac{f'_k}{f'} \frac{60}{B} K_i.$$

Значение K_i выбирают из таблицы; f' — фокусное расстояние контролируемой системы.

Разрешающая способность объектива, контролируемого по радиальной мере, мм^{-1} ,

$$N = m/(\pi d),$$

где m — число пар темных и светлых секторов меры; d — наибольший размер кружка размытия меры.

В угловой мере для телескопических систем разрешающая способность, $''$, по штриховой мере

$$\psi = \frac{206\,265}{f'_k N};$$

по радиальной мере

$$\psi = \frac{\pi d}{m f'_k} 206\,265.$$

Фотографические системы, служащие для передачи изображения на фотослой (фото- и кинопленка, фотопластинка), контролируют фотографическим способом, т. е. измеряют фотографическую разрешающую способность. Фотографический способ определения разрешающей способности заключается в фотографировании на фотопленку штриховых или радиальных мер с последующей расшифровкой их изображений на пленке с помощью микроскопа 10 ... 40 \times увеличения. Фотографическая разрешающая способность выражается предельной пространственной частотой (числом линий на один миллиметр, отдельно видимых на негативе, полученном при заданных условиях экспонирования и проявления).

Значение фотографической разрешающей способности по штриховой мере определяется по последнему элементу (квадрату), в котором и до которого все четыре направления штрихов разрешаются по всей их длине, а число штрихов в изображении равно числу штрихов на соответствующем элементе меры.

Значение фотографической разрешающей способности по радиальной мере определяется наибольшим размером размытой части изображения меры на негативе. Границей размытия считается тот участок изображения меры от центра, на котором начинают различаться секторы меры.

Фотографическую разрешающую способность объективов с большим фокусным расстоянием измеряют на оптической скамье

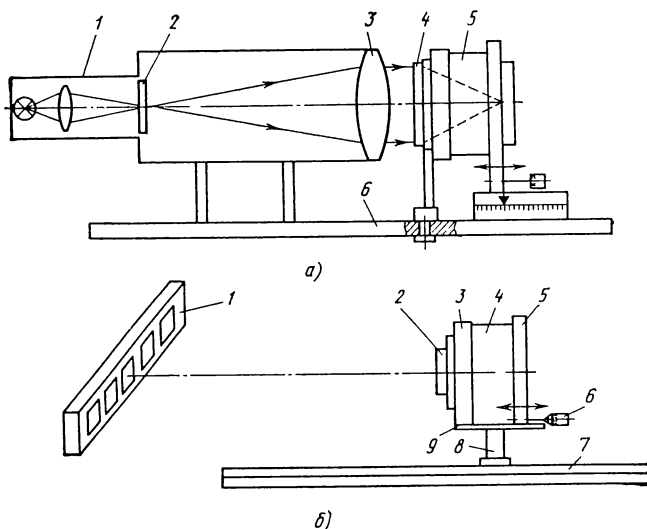


Рис. 146. Измерение фотографической разрешающей способности объективов:

a — длиннофокусных; *б* — короткофокусных

с поворотным устройством. На устройстве, состоящем из точной фотокамеры и щита с мирами, проводят фотографический контроль короткофокусных объективов и объективов с конечного расстояния.

На оптической скамье 6 (рис. 146, *a*) устанавливают эталонную фотокамеру 5 с механизмом точного перемещения вдоль оптической оси. Контролируемый объектив 4 закрепляют в объективодержателе так, чтобы плоскость входного зрачка совпадала с осью вращения поворотного устройства.

Номер штриховой миры 2, расположенной в фокальной плоскости объектива 3 коллиматора и освещаемой осветителем 1, выбирают таким образом, чтобы ожидаемый предельно разрешаемый контролируемым объективом элемент приходился приблизительно на средние элементы миры. Первоначально камеру устанавливают так, чтобы плоскость пленки совпадала с плоскостью наилучшего изображения, определяемой визуально с помощью микроскопа по наиболее резкому изображению миры на матовом стекле. Фотографирование выполняют при полном открытии диафрагмы контролируемого объектива. Для нахождения плоскости наилучшего фотографического изображения фотографируют в нескольких плоскостях. Для этого камеру перемещают вдоль оптической оси на расстояние Δ в ту и другую сторону от первоначальной установки: $\Delta = 0,01l'_{06}/D$. Для короткофокусных объективов рекомендуется выбирать $\Delta < 0,01l'_{06}/D$, а для длиннофокусных $\Delta > 0,01l'_{06}/D$.

Поворотное устройство оптической скамьи используют для определения разрешающей способности для разных точек поля контролируемого объектива, которые определяют в зависимости от формата кадра. Так, для формата 24×36 мм измерения выполняют в точках с координатами $y = 0; 5; 10; 12,5; 15; 17,5; 21,5$ мм; для формата 18×34 мм $y = 0; 3; 6; 9; 12; 15$ мм; для формата 60×60 мм $y = 0; 10; 20; 25; 30; 35; 42,5$ мм. Для каждой точки поля измеряют разрешающую способность в двух взаимно перпендикулярных сечениях объектива.

Схема устройства, применяемая для измерения фотографической разрешающей способности короткофокусных объективов, показана на рис. 146, б. Устройство состоит из фотографируемого щита 1, точной фотокамеры 4 с контролируемым объективом 2, стойки 8 и цилиндрических направляющих рельсов 7, по которым перемещается фотокамера в направлении, перпендикулярном к щиту. Щит с расположенными в одной плоскости прозрачными мирами абсолютного контраста, освещается импульсными лампами с цветовой температурой, близкой к дневному свету. В щите 1 расположены сверху и снизу рассеивающие отражатели для обеспечения равномерного освещения мир. Фотографирование щита с мирами выполняется с расстояния не менее 50 фокусных расстояний контролируемого объектива, т. е. с практической бесконечности для объективов с относительным отверстием не более $1:2,8$. Если относительное отверстие контролируемого объектива больше, то необходимо убедиться расчетным или экспериментальным путем, что $50f'$ для данного объектива является бесконечностью. Обычно щит имеет форму полосы с одним рядом мир или прямоугольника с несколькими рядами мир в зависимости от размера кадра.

Точная фотокамера 4 состоит из основания 9 с объективодержателем 3, в который устанавливают контролируемый объектив 2, задней платы 5 с кассетой и механизма точного передвижения платы с отсчетным барабаном 6. Погрешность отсчета $\pm 0,002$ мм. Кассета снабжена узлом пневматического выравнивания пленки, обеспечивающим положение плоскостности эмульсионного слоя с погрешностью $\pm 0,005$ мм.

Перед измерениями устройство юстируют. Основная цель юстировки — обеспечение параллельности посадочного торца объективодержателя и плоскости столика кассеты с погрешностью до $1'$ и параллельности плоскости столика и плоскости расположения мир на щите с погрешностью $\pm 0,5/\beta$, где β — поперечное увеличение при фотографировании. Оптическая ось контролируемого объектива должна проходить через центр средней миры.

Выполнив юстировку устройства и установив его на необходимое расстояние от щита, предварительно находят положение плоскости наилучшего изображения по центральной миры с помощью микроскопа, который крепится к плате камерной части, и матового стекла, устанавливаемого вместо кассеты. Затем, уста-

новив фотопленку в кассету, фотографируют щит в нескольких плоскостях, смещая кассету на расстояния с интервалом Δ . Щит с мирами, расположенными в один ряд, фотографируют дважды. Второй раз объектив поворачивают на 90° вокруг оптической оси. Таким образом определяют разрешающую способность по двум сечениям объектива. Негативы снимков расшифровывают так же, как и при определении разрешающей способности на оптической скамье. При расшифровке штриховых мир пользуются вспомогательной таблицей, рассчитанной по формуле $N = 1/(a\beta)$, где a — расстояние между штрихами (темными или светлыми); β — используемое при съемке увеличение.

По результатам расшифровки определяют плоскость изображения, в которой фотографическая разрешающая способность объектива в центре поля оказалась наибольшей.

Результаты измерений при испытаниях опытных образцов представляются в виде графиков зависимостей: разрешающей способности от положения плоскости изображения для сагиттального и меридионального направлений; разрешающей способности по полю в плоскости изображения.

Погрешность фотографического метода составляет приблизительно 10 %.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ

Методы измерения параметров пятна рассеяния делятся на визуальные и фотоэлектрические. Визуальные методы используют для исследования оптических систем в видимой области спектра. Измерения могут выполняться на оптической скамье с помощью микроскопа с окуляром-микрометром или на специальном устройстве, состоящем из тех же элементов (рис. 147).

В фокальной плоскости объектива 4 коллиматора располагается точечная диафрагма 3, освещаемая источником света 1 через конденсор 2 и светофильтр. Контролируемый объектив 5, расположенный на минимальном расстоянии от объектива коллиматора, создает изображение бесконечно удаленной точечной диафрагмы в виде пятна рассеяния. Измерение осуществляют в плоскости наилучшего изображения, определяемой с помощью

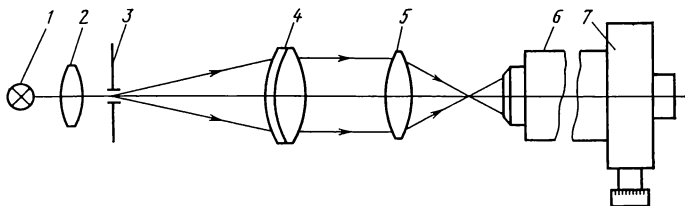


Рис. 147. Схема установки для изучения и контроля пятна рассеяния

микроскопа 6 по наилучшей резкости изображения. Окулярном-микрометром 7 измеряют диаметр центрального светлого кружка.

Для получения дифракционного изображения диаметр точечной диафрагмы выбирают из условия заданной погрешности измерений. Если $\Delta\delta'/\delta \leq 0,01K$, то

$$d \leq \frac{\delta f'_k}{f'_{06}} 0,01K, \quad (90)$$

где K — число процентов; δ — ожидаемый диаметр пятна рассеяния; f'_{06} — фокусное расстояние контролируемого объектива. Для исключения влияния aberrаций объектива коллиматора его фокусное расстояние f'_k выбирают в 5—6 раз больше фокусного расстояния контролируемого объектива. Например, если относительная погрешность $\Delta\delta/\delta$ измерения диаметра пятна не должна превышать 10 %, то на основе формулы (90) диаметр точечной диафрагмы d должен быть меньше $0,5\delta$. Апертура объектива микроскопа должна быть больше апертурного угла контролируемого объектива.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРА ПЯТНА РАССЕЯНИЯ

Размер пятна рассеяния с помощью секторного растра (радиальной миры) можно измерить как в видимой, так и в невидимой области спектра. Метод измерения основан на изменении глубины модуляции потока излучения в зависимости от перемещения пятна рассеяния от центра к краю сектора растра, т. е. в зависимости от радиуса растра, на который проецируется пятно рассеяния.

При перемещении пятна рассеяния вдоль сектора растра (рис. 148, а) амплитуда модулированного потока излучения будет увеличиваться до тех пор, пока пятно не впишется в угол сектора. В этом случае будет обеспечена 100 %-ная модуляция по-

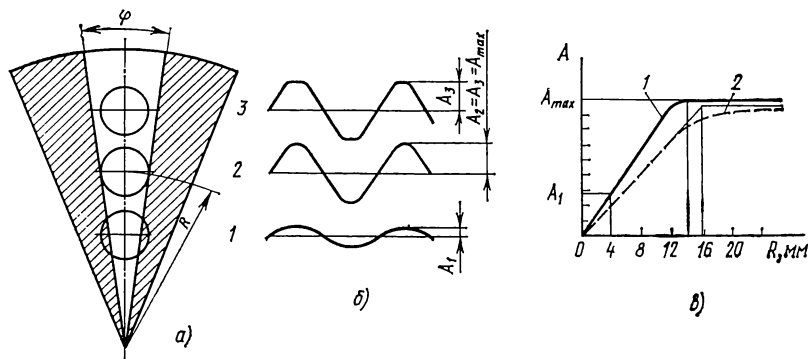


Рис. 148. Измерение пятна рассеяния с помощью секторного растра:

а — перемещение пятна рассеяния вдоль сектора растра; б — изменение амплитуды модулированного потока излучения; в — график зависимости потока излучения от радиуса растра

тока излучения и амплитуда сигнала его достигнет максимального значения A_{\max} (рис. 148, б). Дальнейшее перемещение пятна не вызовет изменения амплитуды сигнала, а только изменит его форму.

По радиусу R раstra, на котором амплитуда сигнала имеет максимальное значение и при дальнейшем перемещении пятна вдоль сектора заметно не увеличивается, определяют размер пятна в направлении сканирования:

$$l = 2R \sin (\varphi/2), \quad (91)$$

для практического использования можно принять

$$l = \pi R/m, \quad (92)$$

где R — фиксированный радиус секторного раstra при максимальном значении амплитуды сигнала; φ — угол сектора раstra; m — число пар секторов раstra.

Графическая зависимость изменения амплитуды сигнала A при модулировании пятна рассеяния на различных радиусах раstra показана на рис. 148, в (кривая 1). При пятне рассеяния с неявно выраженными границами изменение амплитуды сигнала может быть плавным (кривая 2), т. е. не будет четкого фиксирования максимального значения. Тогда радиус раstra для определения пятна рассеяния по формулам (91) и (92) находят, аппроксимируя кривую 2 как кривую с равномерным распределением энергии по пересечению прямых пропорционального изменения и максимального постоянного сигнала. На рис. 148, в найденное таким способом значение R отмечено стрелкой. Радиус раstra определяют также по амплитуде сигнала, равного 0,7 ... 0,9 его максимального значения. Выбор методики измерения размера пятна методом секторного раstra зависит от характера распределения энергии в пятне рассеяния и от требований, предъявляемых к контролируемой оптической системе.

Измерения выполняют в различных направлениях, чтобы определить форму пятна рассеяния в меридиональном и сагиттальном сечениях. Схема устройства (рис. 149) для измерения пятна рассеяния контролируемого объектива методом секторного раstra содержит коллиматор с точечной диафрагмой 3, которая освещается источником излучения 1 через конденсор 2. Диафрагма 3 расположена в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5, представляющего собой внеосевое параболическое зеркало.

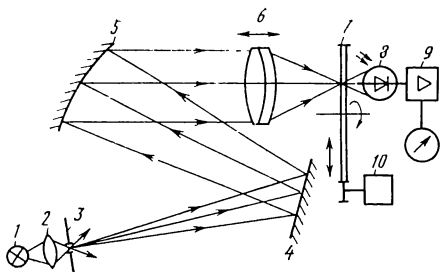


Рис. 149. Схема устройства для измерения размера пятна рассеяния методом секторного раstra

У зеркального объектива отсутствует хроматическая аберрация, что важно при контроле объективов в широком диапазоне спектра.

Контролируемый объектив 6 проецирует точечную диафрагму 3 в виде пятна рассеяния. В плоскость наилучшего изображения диафрагмы помещен модулирующий растр 7. Число секторов растра выбирают в зависимости от размеров предполагаемого диаметра пятна рассеяния объектива. Растр вращается малогабаритным электродвигателем 10 с постоянной скоростью. Фотоприемник 8 преобразует периодические световые сигналы в электрические. В качестве фотоприемника используют фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотодиоды и фотоумножители, т. е. фотоприемники, имеющие линейную световую характеристику. Электрические сигналы поступают на усилитель 9 и далее — на электроизмерительный прибор (гальванометр или осциллограф). Плоское зеркало 4 служит для сокращения габаритных размеров прибора.

Пределы измерения размеров пятна рассеяния, зависящие от числа секторов растра, находят по формулам

$$l_{\max} = 2R_{\max} \sin(\varphi/2); \quad l_{\min} = 2R_{\min} \sin(\varphi/2).$$

или, с практически достаточной точностью, по формулам

$$l_{\max} = \pi R_{\max}/m; \quad l_{\min} = \pi R_{\min}/m.$$

Здесь R_{\max} , R_{\min} — максимальный и минимальный фиксированные радиусы при максимальном сигнале, т. е. при 100 %-ной модуляции:

$$R_{\max} = R_{\text{н}} - l_{\max}/2; \quad R_{\min} = R_{\text{вн}} + l_{\min}/2,$$

где $R_{\text{вн}}$ и $R_{\text{н}}$ — внутренний и наружный радиусы растра.

Методика измерений заключается в следующем: установив контролируемый объектив 6 в объективодержатель, перемещают его вдоль оптической оси, определяя плоскость изображения по максимальному сигналу на измерительном приборе. Максимальное отклонение стрелки электроизмерительного прибора фиксирует плоскость наилучшего изображения. В этой плоскости и выполняют измерения. Перемещают растр перпендикулярно к оптической оси. Максимальное отклонение стрелки наблюдается при полном перекрытии пятна рассеяния секторами растра, т. е. при 100 %-ной модуляции потока излучения. По радиусу, зафиксированному в этом положении, вычисляют размер пятна в направлении сканирования. Шкалу поперечного перемещения растра можно проградуировать непосредственно в размерах пятна рассеяния согласно формуле (91) или (92).

Чувствительность схемы определяется по изменению падающего на фотоприемник потока излучения, выраженного в делениях шкалы электроизмерительного прибора, при перемещении пятна вдоль сектора растра и зависит как от характеристик оптических элементов (источника света, конденсора, коллиматорного

объектива), так и от параметров электрической измерительной части схемы.

Относительная погрешность измерений размера пятна рассеяния методом секторного раstra практически не превышает 0,1 % при $m = 180$. Следует отметить, что чем больше число секторов раstra, тем меньше погрешность измерения.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПЯТНЕ РАССЕЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТИВА

Метод измерения основан на фотометрировании изображения точечного источника путем пропускания света сквозь постепенно увеличивающиеся в диаметре круглые отверстия.

Схема для измерения (рис. 150, а) содержит контролируемый объектив 5, проецирующий изображение точечной диафрагмы 3, освещенной источником света 1 через конденсор 2, с помощью коллиматорного объектива 4 в плоскость наилучшего изображения. Микрообъектив 6 переносит это изображение в плоскость диска 7, на котором расположены круглые отверстия с разными диаметрами. Плоское зеркало 9 с 90 %-ным отражением делит световой поток на две части. Одна часть (10 %) используется для юстировки посредством окуляра 10, предназначенного для визуального наблюдения, другая часть (90 %) ограничивается круглыми диафрагмами и с помощью фотоприемника 8 преобразуется в электрические сигналы. Фототок на выходе фотоприемника регистрируется гальванометром.

Плоскость изображения вначале находят визуально по наилучшей резкости изображения любого отверстия, а затем уточняют по максимальному значению сигнала при установке на диске наименьшего отверстия. Максимальное значение сигнала определяют перемещением контролируемого объектива вдоль оптической оси. Значение показания гальванометра при наименьшем отверстии записывают и дальнейшие измерения выполняют в этой плоскости, увеличивая постепенно размер отверстий, пока показания гальванометра не перестанут увеличиваться. Разделив значение фототока I_i , измеренное гальванометром при данном отверстии, на значение фототока I_{\max} при максимальном диаметре

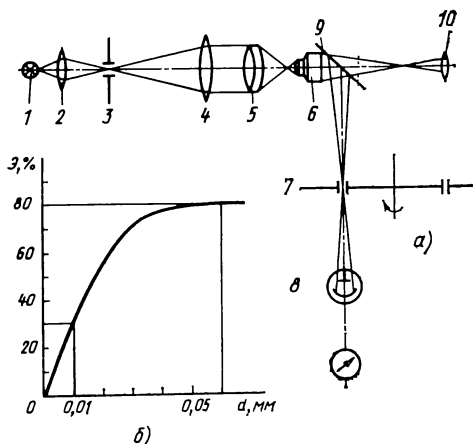


Рис. 150. Измерение распределения энергии в пятне рассеяния объектива:

а — схема устройства; б — график зависимости энергии от диаметра диафрагмы

отверстия (рис. 150, б), находят процент энергии \mathcal{E} потока излучения для любого отверстия:

$$\mathcal{E} = \frac{I_i}{I_{\max}} 100\%.$$

По полученным результатам строят график зависимости энергии от диаметра диафрагмы. Интерпретация графика для изображения осевой точки такова: 30 % всей энергии потока излучения пятна рассеяния приходится на кружок диаметром $d = 0,01$ мм, 80 % — на кружок диаметром 0,06 мм. Заметим, что эта кривая не является кривой распределения освещенности в изображении пятна рассеяния. Чтобы найти освещенность для любого значения d , кривую необходимо дифференцировать. Максимальная погрешность измерений возникает при наибольших значениях диафрагм и зависит от точности изготовления диафрагм и определения плоскости наилучшего изображения, от согласованности источника излучения с приемником и от точности измерительного прибора. Относительная погрешность измерений по методу круглых диафрагм не превышает 10 %.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ В ПЯТНЕ РАССЕЯНИЯ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЩЕЛИ

Метод сканирующей щели используют для получения функции рассеяния изображения бесконечно удаленной светящейся линии. Схема устройства приведена на рис. 151, а. Источник света 1 через конденсор 2 и светофильтр 3 освещает тест-объект 4, расположенный в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5. В качестве тест-объекта может быть установлен любой элементарный объект (точечная диафрагма, щель). Свето-

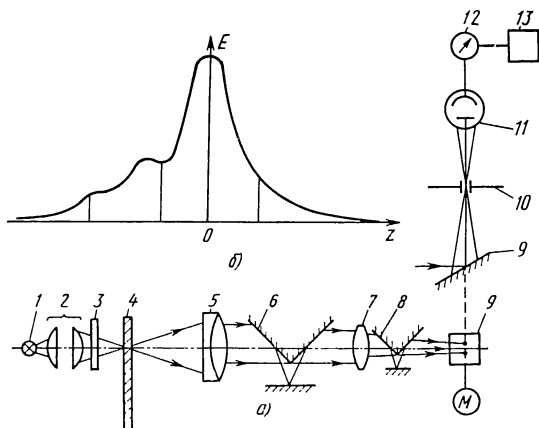


Рис. 151. Устройство для получения функции рассеяния линии:

а — схема; б — фотограмма распределения освещенности в изображении светящейся линии

фильтр 3 применяют для коррекции спектральной чувствительности фотоприемника. Контролируемая оптическая система 7 через зеркальные системы 6 и 8, плоское зеркало 9 передает бесконечно удаленный тест-объект в плоскость изображения контролируемой системы, в которой расположена сканирующая щель 10. Зеркальная система 6 поворачивает изображение тест-объекта вокруг оси, параллельной оптической оси коллиматора, на значение удвоенного угла поворота. При повороте получают любую ориентацию изображения. Зеркальная система 8 компенсирует вращение изображения и устанавливает его параллельно сканирующей щели 10. Зеркало 9 установлено под углом 45° к оптической оси и с помощью электродвигателя М медленно поворачивается. Фотоприемник 11 преобразовывает световой поток в электрические сигналы, которые регистрируются гальванометром 12 или записываются на светочувствительной бумаге, помещенной в цилиндрической кассете 13.

Фотограмма (рис. 151, б) представляет собой кривую распределения освещенности в изображении светящейся линии. Контролируемая оптическая система дает несимметричное изображение линии в центре поля.

Основная погрешность измерения зависит от ширины сканирующей щели: чем уже сканирующая щель, тем выше точность измерения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ МЕТОДОМ СКАНИРОВАНИЯ ТОЧЕЧНОЙ ДИАФРАГМОЙ

Метод сканирования изображения точечной диафрагмой основан на сканировании пятна рассеяния отверстием малого диаметра в продольном (вдоль оптической оси) и поперечном (перпендикулярно к оптической оси) направлениях. Он позволяет измерить объемную функцию рассеяния (третьей координатой является освещенность). Метод применяют как для исследований оптической системы в целях изучения влияния аберраций на распределение освещенности в изображении точки, так и для контроля качества изображения по числовому критерию — диаметру центрального кружка пятна рассеяния с заданным содержанием энергии.

Метод определения объемной функции рассеяния заключается в следующем. Увеличенное пятно рассеяния сканируется точечной диафрагмой, диаметр которой в 40 ... 50 раз меньше исследуемого поля. Это позволяет передать с высокой точностью микроструктуру изображения. Поток излучения, прошедший через сканирующую диафрагму, пропорционален значению освещенности в данной точке поля.

Поскольку сканирующая диафрагма очень мала по сравнению с полем анализа, ее пропускание можно приближенно аппроксими-

ровать δ -функцией, которая обладает следующими свойствами:

$$\delta(x - x_0) = \begin{cases} \infty & \text{при } x = x_0, \\ 0 & \text{при } x \neq x_0; \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0) dx = 1; \quad \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \delta(x - x_0) dx = \varphi(x_0).$$

При одномерном сканировании поток излучения, прошедший через сканирующую диафрагму,

$$\Phi(x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \delta(x - x_0) dx = A(x_0), \quad (93)$$

где $A(x)$ — функция рассеяния исследуемого объекта в направлении сканирования; x_0 — координата сканирующей диафрагмы; x — текущая координата поля анализа.

Следовательно, поток излучения, прошедший через сканирующую диафрагму, пропорционален значению функции рассеяния в точке с координатой x_0 .

Сканируя пятно рассеяния по всей плоскости и регистрируя поток излучения с помощью фотоприемника, преобразующего световые сигналы в электрические, получают двумерную функцию рассеяния контролируемой оптической системы (рис. 152).

Для определения размеров пятна рассеяния с заданным содержанием энергии находят поперечные сечения объемной фигуры функции рассеяния на установленном уровне освещенности (рис. 153) плоскостью, перпендикулярной к оптической оси. Это осуществляется с помощью запираания электронно-лучевой трубки напряжением, пропорциональным заданному уровню освещенности. Запирающее напряжение u_3 подается на электронно-лучевую трубку. Если напряжение электрического сигнала, поступающего с фотоприемника, меньше u_3 , то сигнал на трубку не проходит. Если напряжение сигнала больше u_3 , то сигнал на трубку проходит, и на экране электронно-лучевой трубки наблюдают яркостную картинку кружка с заданным уровнем освещенности.

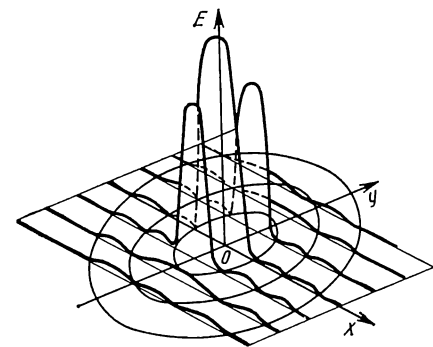


Рис. 152. Продольные сечения функции рассеяния точки

Схема микрофотометра (рис. 154), реализующая метод сканирования точечной диафрагмой, состоит из коллиматора с модулирующим устройством, сканирующего устройства и записывающей электронной системы. Источник света 1 через конденсор 2 освещает

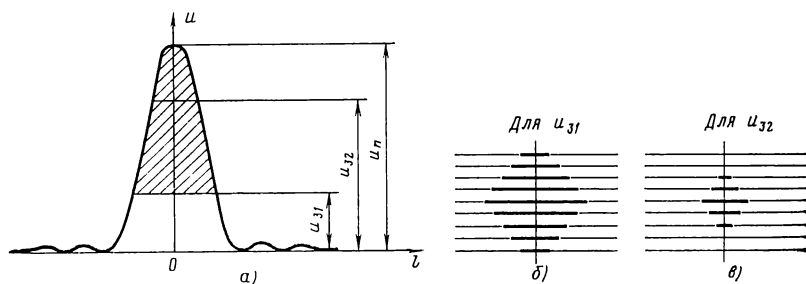


Рис. 153. Получение поперечных сечений функции рассеяния:

a — функция рассеяния; b — поперечное сечение на уровне 0,3 освещенности; v — поперечное сечение на уровне 0,6 освещенности

щает точечную диафрагму 4, расположенную в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5. Размер диафрагмы определяется согласно формуле (90). Для модуляции потока излучения перед диафрагмой (или после нее) размещен модулятор 3.

Модулированный поток излучения позволяет применить в электронной схеме микрофотометра усилитель переменного тока, который стабилен в работе и обеспечивает линейное усиление сигнала, что в значительной степени положительно влияет на точность измерения. Модуляция должна быть 100 %-ной, чтобы обеспечить максимальную амплитуду изменения потока излучения. Частота модуляции $f = nm$, где n — частота вращения модулятора; m — число просветов в модуляторе.

Контролируемая оптическая система 6 проецирует диафрагму 4 в плоскость изображения. С помощью набора микрообъективов

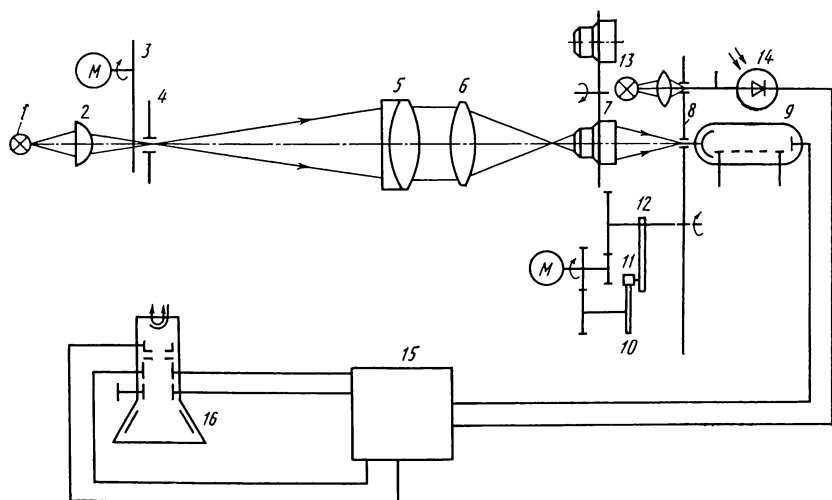


Рис. 154. Схема микрофотометра для определения параметров пятна рассеяния

с различным увеличением; установленных на револьверном диске 7, увеличивают изображение пятна рассеяния контролируемой оптической системы, чтобы сканирующее отверстие было не очень маленьким (допустимо 0,02 мм). Различные увеличения микрообъективов нужны для сохранения постоянства увеличенного пятна рассеяния (поля анализа) при исследовании оптических систем, имеющих разное качество изображения, т. е. разные размеры пятна рассеяния.

В плоскости изображения микрообъектива увеличенное пятно рассеяния контролируемой системы сканируется отверстием малого диаметра, расположенным на развертывающем диске 8, входящем в состав сканирующего устройства. Последнее включает также программный механизм, обеспечивающий движение диска по заданной программе, и редуктор с электродвигателем. Развертывающий диск имеет два отверстия: одно — для развертки изображения (сканирующее отверстие), другое — для синхронизации механической и электронной разверток (синхронизирующее отверстие).

Диск приводится во вращение электродвигателем через редуктор. Программный механизм включает кулачок 10, профиль которого выполнен по спирали Архимеда, и рычаг 12 с роликом 11. Кулачок вращается от этого же двигателя и передает движение на развертывающий диск через рычаг 12 и ролик 11. Передаточное отношение редуктора от электродвигателя к диску и кулачку подбирают таким образом, чтобы при повороте кулачка на угол 180° сканирующее отверстие диска прошло все поле анализа. За один оборот диска его ось сместится по вертикали на диаметр сканирующего отверстия, после чего сканирующее отверстие вернется в исходное положение. При повороте кулачка еще на 180° развертки не происходит; за это время аппаратура подготавливается к следующей записи.

Для определения максимального диаметра увеличенного пятна рассеяния, который может быть измерен по данной схеме, находят вертикальный размер поля анализа

$$b = n_d d,$$

где n_d — число оборотов диска за время поворота кулачка на 180° ; d — диаметр сканирующего отверстия, мм.

Число строк развертки поля анализа $K_c = b/d$.

Основной сигнал через сканирующее отверстие в диске поступает на фотоумножитель 9, где преобразуется в электрические импульсы и поступает в записывающую электронную систему 15. Второе отверстие в диске обеспечивает синхронизацию развертки луча электронно-лучевой трубки 16 с перемещением сканирующего отверстия.

Поток излучения источника 13 через конденсор и синхронизирующее отверстие попадает на дополнительный фотодиод 14. При каждом обороте развертывающего диска синхронно с основ-

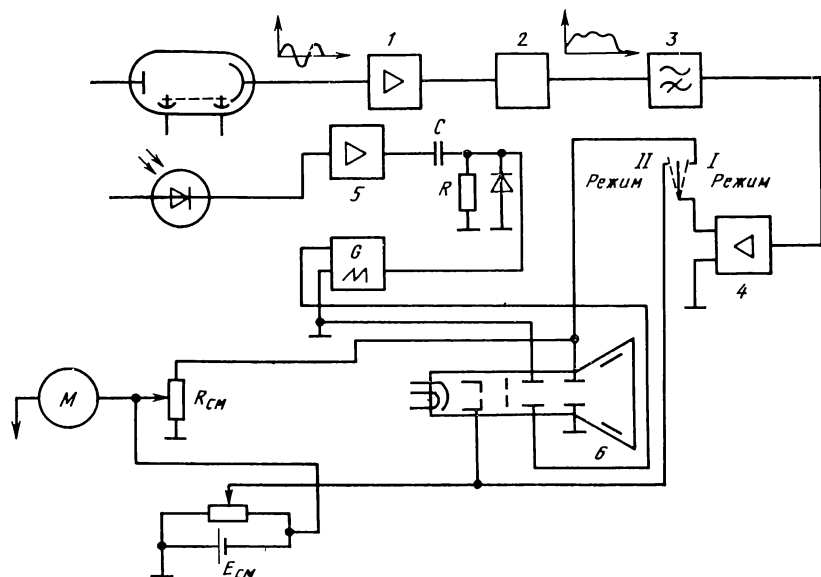


Рис. 155. Схема записывающей электронной системы микрофотометра

ным сигналом от фотоумножителя на записывающее устройство поступает импульс с дополнительного фотодиода. Последний устанавливают в такое положение, что сначала поступает сигнал синхронизации, а затем основной сигнал, т. е. можно регулировать время упреждения сигналов. Диаметр синхронизирующего отверстия выбирают из условия получения импульса с фотодиода 14. Высота импульса зависит от светового потока источника излучения 13 и чувствительности фотодиода 14.

Записывающая электронная система (рис. 155) имеет канал сигнала, канал синхронизации, индикаторное устройство и блок питания.

Канал сигнала состоит из усилителя 1, детектора 2, фильтра 3, подавляющего высокочастотные составляющие для улучшения качества регистрируемого изображения на электронно-лучевой трубке, и низкочастотного широкополосного усилителя 4. Канал сигнала работает в двух режимах I и II, обеспечивая получение продольных сечений объемной фигуры рассеяния и поперечных на заданном уровне освещенности. Режим I позволяет выполнить контроль по объемной функции рассеяния. Режим II удобен для контроля готовой продукции по диаметру пятна рассеяния с заданным содержанием энергии.

Уровень освещенности, соответствующий заданному количеству энергии, обрабатывается электронной схемой смещения с отдельным источником питания E_{CM} . Размер пятна рассеяния по горизонтали $l_r = vt/\bar{G}$, где v — линейная скорость движения ска-

нирующего отверстия диска; t — время записи сигнала; Γ — увеличение микрообъектива.

Линейная скорость движения сканирующего отверстия диска

$$v = 2\pi r n_d,$$

где r — расстояние от центра диска до сканирующего отверстия.

Время записи сигнала определяется числом масштабных меток p , расстояние между которыми соответствует периоду модулированного сигнала $P = 1/f$:

$$t = P(p - 1).$$

При $f = 10$ кГц $P = 0,1$ мс. Масштабные метки формируют подачи на вертикальные отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки напряжения заданной частоты; таким образом, экран трубки фиксирует масштаб по горизонтали.

Вертикальный размер пятна рассеяния

$$l_v = K_c d / \bar{\Gamma},$$

где K_c — число строк развертки на пятне рассеяния.

Канал синхронизации (см. рис. 155) обеспечивает синхронную работу развертывающего устройства и записывающей электронно-лучевой трубки. Он состоит из фотодиода, импульсного усилителя 5, дифференциальной цепочки RC с диодом и генератора горизонтальной развертки G .

В качестве индикаторного устройства используют стандартный электронно-лучевой осциллограф с запоминающей трубкой 6, имеющей длительное послесвечение. Записанные на экране трубки кривые сохраняются в течение нескольких часов. Изображение с экрана трубки можно фотографировать на фотоматериал средней чувствительности. Стирание записанных кривых выполняют электронным лучом.

Относительная погрешность измерений не превышает 10 %.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ПОГРАНИЧНОЙ КРИВОЙ

Пограничную кривую измеряют фотоэлектрическим и фотографическим способами. При первом способе получают зависимость распределения освещенности в изображении границы черного и светлого полей от координаты в направлении фотометрирования; при втором — зависимость плотности почернения пленки при фотографировании пограничного теста от координаты в направлении, перпендикулярном к границе черного и светлого полей.

Фотоэлектрический способ получения пограничной кривой может быть реализован двумя схемами. По первой схеме (рис. 156, а) измерение координат пограничной кривой выполняется сканированием изображения пограничного теста точечной диафрагмой, по второй схеме (рис. 156, б) — сканированием изоб-

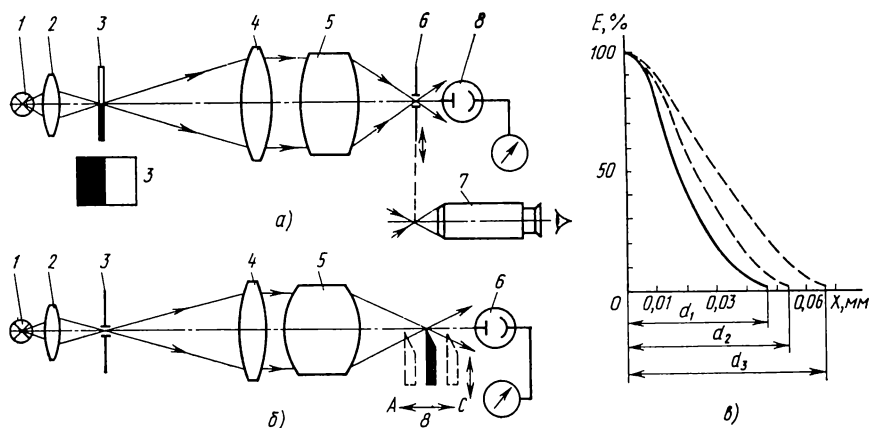


Рис. 156. Схема устройства для получения пограничной кривой:
 а — при прямом ходе лучей; б — при обратном ходе лучей; в — график зависимости освещенности от расстояния $E(x)$

ражения бесконечно удаленной светящейся точки (пятна рассеяния) пограничным тестом.

Первая схема (рис. 156, а) включает коллиматорный объектив 4, в фокальной плоскости которого расположен пограничный тест 3, освещаемый источником 1 с помощью конденсора 2. Контролируемый объектив 5, установленный перед объективом коллиматора, проецирует изображение теста 3 в плоскость наилучшего изображения, которая определяется визуально по наибольшей резкости изображения теста с помощью микроскопа 7. Затем вместо микроскопа в плоскость изображения устанавливают сканирующую точечную диафрагму или щель 6, перемещаемую перпендикулярно к границе темного и светлого полей. За сканирующей диафрагмой устанавливают фотоприемник 8, преобразующий световой поток в электрические сигналы, регистрируемые гальванометром. Показания гальванометра пропорциональны значениям освещенности $E(x)$ изображения. По ним строят график зависимости $E(x)$ (рис. 156, в), где x — значение перемещения сканирующей диафрагмы относительно изображения пограничного теста.

По второй схеме (рис. 156, б) в фокальной плоскости коллиматорного объектива 4 в качестве тест-объекта установлена точечная диафрагма 3, освещаемая источником света 1 через конденсор 2. Размер ее выбирают таким, чтобы обеспечить получение дифракционного пятна рассеяния контролируемого объектива 5 [см. формулу (90)]. Дифракционное пятно в плоскости изображения сканируют пограничным тестом 8, в качестве которого используют нож (лезвие бритвы). Для получения пограничной кривой нож перемещают перпендикулярно к оптической оси.

Фототок, вырабатываемый фотоприемником 6, поступает на гальванометр. Плоскость изображения, в которой выполняют

измерения, определяют либо визуально (с помощью дополнительного микроскопа, в предметной плоскости которого устанавливают нож), либо фотоэлектрически с помощью ножа. Для этого подводят нож 8, перемещая его перпендикулярно к оптической оси, до соприкосновения (или небольшого перекрытия) со световым пучком (положение A на рис. 156, б), что соответствует уменьшению показания гальванометра. Затем перемещают нож вдоль оптической оси до положения C , при котором показание гальванометра то же, что при положении A . Расстояние между положениями A и C ножа, измеренное по шкале продольного перемещения ножа, делят пополам, определяя тем самым приближенно положение плоскости изображения. В этой плоскости перемещают нож перпендикулярно к оптической оси и снимают показания гальванометра, пропорциональные освещенности в точках, отмеченных по шкале поперечного перемещения. По результатам строят график $E(x)$, где x — перемещение ножа.

Для более точного определения плоскости изображения снимают пограничные кривые в рядом расположенных плоскостях. В плоскости наилучшего изображения пограничная кривая имеет максимальный пограничный градиент, характеризуемый максимальным наклоном касательной к средней части пограничной кривой. При измерении в разных плоскостях наблюдается изменение наклона пограничной кривой (рис. 156, в), соответствующее изменению резкости изображения. Чем ближе кривая, тем менее резкое изображение края. Размеры d_2, d_3 соответствуют диаметру пятна рассеяния контролируемого объектива при расфокусировке.

Фотографический способ позволяет получить фотографическую пограничную кривую системы объектив—фотослой.

Измерения выполняют на установке, предназначенной для определения фотографической разрешающей способности и состоящей из точной фотокамеры и щита (см. рис. 146, в).

Контролируемый объектив устанавливают в точной фотокамере. На щите в центре и по полю устанавливают пограничные тест-объекты. При фотографировании тест-объектов с расстояния практической бесконечности ($\sim 50f'$) для контролируемого объектива смещают плоскость изображения с определенным шагом (для нахождения наилучшей плоскости изображения). Для длиннофокусных объективов границы черного и белого полей можно фотографировать с помощью коллиматора, в фокальной плоскости которого помещен пограничный тест. Для получения пограничной кривой можно также использовать оптическую скамью с микрофотонасадкой. Полученную пленку фотометрируют на регистрирующем микрофотометре, после чего строят график. По оси ординат откладывают плотности почернения D , а по оси абсцисс — расстояния на пленке x в направлении, перпендикулярном к границе черного и белого полей. Пограничную кривую определяют как для центра поля, так и для различных его точек.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Для экспериментального определения ОПФ, т. е. ее ФПМ и ФПФ, разработан ряд методов, основанных на гармоническом анализе изображения, явлении интерференции и голографии. Методы гармонического анализа изображения получили наибольшее распространение как наиболее простые в конструктивном исполнении и в настройке, стабильные и надежные в процессе измерения. Интерференционные методы, требующие сложной юстировки, дополнительной обработки результатов измерения, высокочувствительные к атмосферным изменениям, не нашли производственного применения.

Голографический метод, позволяющий получить пространственную функцию передачи модуляции и воспроизвести ее по голограмме в любое время, используют для более глубокого исследования оптических систем.

Рассмотрим методы гармонического анализа, применяемые в различных установках для измерения ФПМ и ФПФ. Эти методы основаны на анализе изображения, создаваемого контролируемым объективом. Используя математическое представление ОПФ [см. формулу (87)], можно образовать изображение точечного источника (функцию рассеяния точки или щели) и выполнить его гармонический анализ, измеряя световой поток, проходящий через маски, функция пропускания которых изменяется по синусоидальному закону с различными пространственными частотами.

По определению, ОПФ есть мера способности оптической системы воспроизводить различные пространственные частоты. Поэтому в качестве предмета можно использовать периодические решетки с синусоидальным распределением яркости с различными пространственными частотами и исследовать их изображения, которые также будут синусоидальными, но измененными по амплитуде и смещенными по фазе φ . Смещение возникает вследствие поперечного сдвига изображения, который появляется при наличии несимметричных аберраций (например, комы) контролируемой системы.

Рассмотрим различные возможности для создания экспериментальных устройств. Методы гармонического анализа можно разделить на прямые и косвенные. В прямых методах используют тест-объекты с синусоидальным распределением яркости и маски (анализаторы) с синусоидальным пропусканием, в косвенных — с прямоугольным распределением яркости и прямоугольным пропусканием (прямоугольные миры) с последующим выделением гармонических составляющих. Это выделение возможно, так как в спектре прямоугольной миры данной пространственной частоты содержится несколько составляющих с частотами, превышающими основную в 3, 5, 7, ... раз (см. рис. 133). Амплитуды частот

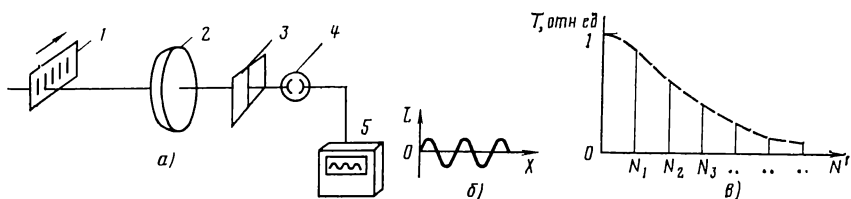


Рис. 157. Прямой метод измерения ОПФ:

a — схема устройства; *б* — распределение яркости $L = f(x)$ в тест-объекте; *в* — график ФПМ

пропорциональны $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{7}$, ... по отношению к первой составляющей.

Прямые методы. В схеме устройства измерения ОПФ (рис. 157, *a*) прямым методом используют набор синусоидальных тест-объектов с различными пространственными частотами и одинаковым контрастом. Чаще всего используют тест-объекты абсолютного контраста как наиболее простые в изготовлении и удобные при измерениях. Тест-объект 1, помещенный на расстояние практической бесконечности или в фокальной плоскости объектива коллиматора, проецируется контролируемым объективом 2 в плоскости сканирующей щели 3, ширина которой не должна превышать 0,1 периода анализируемого изображения. Сканирующую щель устанавливают в плоскости наилучшего изображения контролируемого объектива, определяемой по максимальному сигналу при перемещении его вдоль оптической оси.

Сигнал регистрируют с помощью приемного устройства, которое состоит из фотоприемника 4, преобразующего световые сигналы в электрические, и электроизмерительного прибора 5, в качестве которого можно использовать гальванометр, осциллограф или самописец. При контрасте тест-объекта, равного единице,

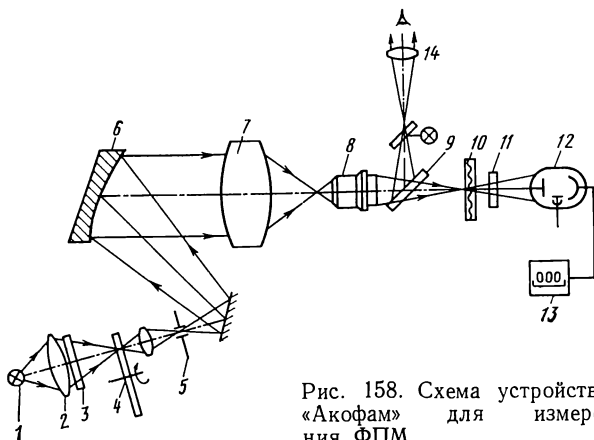


Рис. 158. Схема устройства «Акофам» для измерения ФПМ

амплитуда сигнала пропорциональна контрасту изображения, равному КПМ. Устанавливая синусоидальные миры с различной пространственной частотой, находят ординаты КПМ (рис. 157, в) в зависимости от пространственной частоты N' по показаниям измерительного прибора.

Фазовый сдвиг изображения по отношению к тест-объекту можно определить, если на тест-объект нанести специальные отметки, смещение x' которых в плоскости изображения определит фазу $\varphi = 2\pi N'x'$.

Прямой метод на основе математического выражения ОПФ реализован в серийно выпускаемом во Франции устройстве «Акофам». В качестве тест-объекта в установке использована светящаяся щель 5 (рис. 158), расположенная в фокальной плоскости зеркального объектива 6 коллиматора и освещаемая с помощью источника света 1, конденсора 2 и светофильтра 3. Изображение светящейся щели, создаваемое контролируемым объективом 7 в плоскости наилучшей установки, сканируется поступательно движущимся анализатором 10 в направлении, поперечном расположению щели. Ширина b' изображения щели не должна превышать 0,1 наименьшего периода решетки, еще разрешаемого объективом. Максимальная ширина щели тест-объекта

$$b_{\max} = 0,1f'_k/(f'_{об}N'_{\max}),$$

где f'_k и $f'_{об}$ — фокусные расстояния соответственно объектива коллиматора и контролируемого объектива; N'_{\max} — максимальная пространственная частота.

Анализатор состоит из шести синусоидальных решеток с различными пространственными частотами (0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1 мм⁻¹). Пользуясь тремя сменными микрообъективами 8 с увеличениями 25, 50 и 100×, можно получить дискретные значения пространственных частот, соответствующих частотам самих синусоидальных решеток от 2,5 до 100 мм⁻¹. Световой поток, модулированный с помощью модулятора 4, после анализатора 10 и пластины 11 попадает на фотоэлектронный умножитель 12, который преобразует его в электрические сигналы. Амплитуда электрических сигналов пропорциональна КПМ для установленной пространственной частоты. Измерения ФПМ объектива по полю выполняют с помощью поворота коллиматора, при этом ось вращения должна проходить через входной зрачок контролируемого объектива.

Результаты измерений КПМ фиксируются в виде цифр на табло электронного блока 13. Для визуального наблюдения изображения предусмотрена система, состоящая из зеркала 9 и окуляра 14. При измерении ФПМ зеркало 9 откидывают.

Установка «Акофам» позволяет измерять ФПМ объективов с фокусным расстоянием 10 ... 1000 мм. Сложность изготовления синусоидальных мир и зависимость результатов измерения от

точности их изготовления привели к использованию более простых тест-объектов — прямоугольных решеток.

Косвенные методы. Эти методы позволяют измерять ФПМ и ФПФ по прямоугольным мирам. ФПМ, измеренную по прямоугольным мирам, можно применять для сравнения качества отдельных объективов. При определении ФПМ сложных систем, состоящих из нескольких элементов, имеющих свои частотные характеристики, нельзя использовать простую зависимость, определяющую ФПМ как произведение ФПМ отдельных элементов, измеренных по прямоугольным мирам. Формула (89) справедлива при условии измерения ФПМ по синусоидальным мирам. Однако измерив ФПМ по прямоугольным мирам, можно пересчитать ее на ФПМ, определенную по синусоидальным мирам, по формуле Кольтмена:

$$T(N) = \frac{\pi}{4} \left[M(N) + \frac{1}{3} M(3N) - \frac{1}{5} M(5N) + \frac{1}{7} M(7N) - \dots \right],$$

где $M(N)$ — коэффициент передачи модуляции, измеренный по прямоугольной мире. Этот процесс очень трудоемкий, поэтому пользуются устройствами, позволяющими разложить функцию пропускания прямоугольной решетки на отдельные синусоидальные составляющие (гармоники) и измерить амплитуды и фазы выделенных гармоник.

В зависимости от способа выделения синусоидальных составляющих из прямоугольной решетки различают метод непосредственного сканирования, метод гармонического анализа электрическим фильтром и метод гармонического анализа пространственным фильтром.

МЕТОД НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СКАНИРОВАНИЯ

Устройства для измерения ФПМ по методу непосредственного сканирования по прямоугольным мирам (рис. 159) состоят из источника света 1, тест-объекта (прямоугольной решетки) 2, объектива 3 коллиматора, контролируемого объектива 4, микрообъектива 5, сканирующей щели 6, фотоприемника 7, усилителя 8, осциллографа 9.

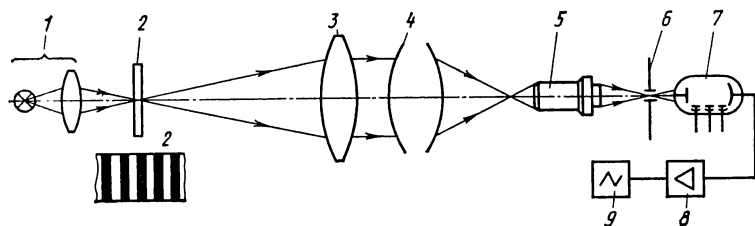


Рис. 159. Схема устройства для измерения ФПМ объектива методом непосредственного сканирования

Пространственная частота, при которой определяется КПМ, в плоскости наилучшего изображения

$$N' = N\beta = Nf_k/f_{\text{ог}}, \quad (94)$$

где N — пространственная частота прямоугольной решетки, мм^{-1} ; β — увеличение системы объектив коллиматора — контролируемый объект.

Изменение N' может происходить за счет изменения пространственной частоты тест-объекта 2 или изменения фокусного расстояния объектива 3 коллиматора. Микрообъектив 5 используют для увеличения изображения тест-объекта в целях расширения сканирующей щели 6. Ширину сканирующей щели выбирают равной не более четверти периода изменения освещенности изображения наименьшей пространственной частоты, при которой выполняют измерения.

Световой поток, прошедший через щель, преобразуется фотоприемником 7 в электрические сигналы, которые поступают в усилитель 8 (электрический фильтр), настроенный на частоту первой гармоники прямоугольной волны. Тогда значение амплитуды первой гармоники, регистрируемое осциллографом, будет пропорционально КПМ данной пространственной частоты, что соответствует КПМ, найденному по синусоидальной волне. Меняя пространственные частоты прямоугольных решеток и выделяя первые гармоники, определяют ФПМ по синусоидальной решетке. Для ускорения процесса измерения сменные прямоугольные решетки заменяют одним тест-объектом с переменной частотой штрихов. При этом скорость сканирования необходимо изменять по закону, по которому изменяются и частоты решеток, чтобы временная частота f настройки электрического фильтра была постоянной:

$$f = N'v = \text{const}, \quad (95)$$

где N' — частота первой гармоники прямоугольной решетки, равная частоте штрихов в плоскости изображения; v — скорость сканирования изображения.

Непостоянство пространственной частоты во время измерения вызывает погрешность измерения КПМ, которая не превышает 1 %.

Для измерения ФПМ и ФПФ по методу непосредственно сканирования разработан ряд устройств.

Устройства ЭОС-1 и ЭОС-2, разработанные в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэрофотосъемки и картографии (ЦНИИГАиК), предназначены для исследования объектов с фокусным расстоянием 12 ... 150 мм как с аэрофотоаппаратом, так и без него. В качестве тест-объекта в устройстве ЭОС-1 (рис. 160) используют барабан 6, на внешней поверхности которого нанесены штрихи прямоугольной решетки, состоящей из 11 участков с разными пространственными частотами. Плоскость решетки располагается на расстоянии практической бес-

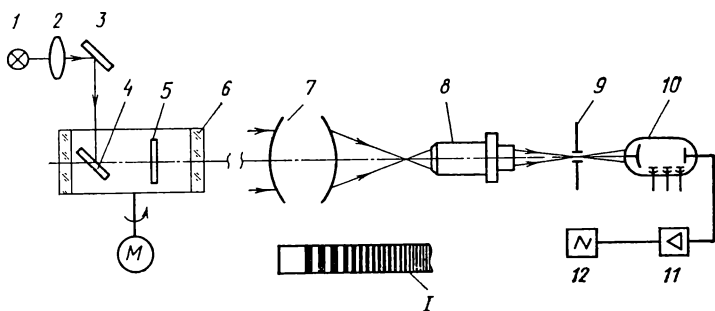


Рис. 160. Схема устройства ЭОС-1 для измерения ОПФ:

I — решетка с переменной пространственной частотой

конечности от контролируемого объектива. Коллиматор в схеме отсутствует. Пространственные частоты в плоскости изображения $N' = 30N$, так как расстояние от решетки до объектива равно $30f'$, т. е. объектив изображает решетку с $30\times$ увеличением.

Барабан вращается электродвигателем *M* с постоянной скоростью. Поле решетки, расположенное перпендикулярно к оптической оси контролируемого объектива, освещается источником света *1* через конденсор *2*, зеркала *3*, *4* и светофильтр *5*. Контролируемый объектив *7* проецирует решетку в плоскость наилучшего изображения (в плоскость наибольшей резкости). С помощью микрообъектива *8* изображение решетки переносится с увеличением в плоскость сканирующей щели *9*. Периодические световые сигналы, преобразованные фотоумножителем *10*, после усиления усилителем *11* регистрируют на экране осциллографа *12* и измеряют значения сигнала от различных участков решетки. Предварительно определяют масштаб по нулевой пространственной частоте, которая на барабане соответствует широкому светловому полю (см. рис. 160). Установка ЭОС-1 измеряет ФПМ по прямоугольным решеткам, затем ФПМ можно пересчитать по формуле Кольмена.

В устройстве ЭОС-2 в качестве тест-объекта используют прямоугольную решетку с непрерывно меняющейся пространственной частотой штрихов. Решетка перемещается с помощью тангенсного механизма со скоростью, плавно меняющейся по закону, обратному изменению ширины штрихов решетки. Синусоидальные составляющие выделяют с помощью резонансного усилителя, настроенного на постоянную временную частоту f , вычисляемую по формуле (95). В устройстве предусмотрен механизм для измерения ФПФ.

В устройстве ЭРОС-100 (Великобритания) (рис. 161), разработанном на основе метода непосредственного сканирования, изменение пространственной частоты происходит непрерывно вследствие наклона штрихов прямоугольной решетки, с постоянной

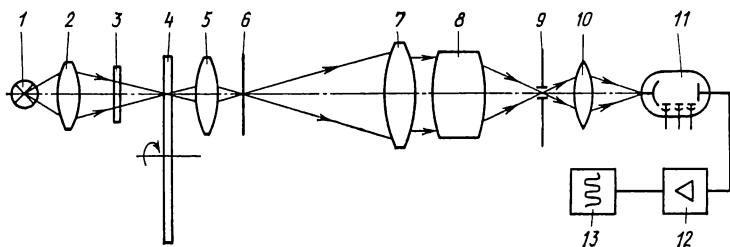


Рис. 161. Схема устройства ЭРОС-100

частотой относительно ограничительной щели (рис. 162). При этом пространственная частота тест-объекта $N = \frac{1}{p} \sin \theta$, где p — период прямоугольной решетки; θ — угол наклона штрихов к ограничительной щели.

При наклоне штрихов решетки относительно ограничительной щели на $0 \dots 90^\circ$ происходит непрерывное изменение пространственной частоты от нуля до максимального значения. При $\theta = 90^\circ$ тест-объект имеет пространственную частоту, равную частоте решетки $1/p$. При $\theta = 0$ штрихи решетки параллельны ограничительной щели, пространственная частота равна нулю. При этом временная частота f остается постоянной для всех пространственных частот. Решетка с прямоугольными штрихами выполнена на диске 4 (см. рис. 161) в виде кольца радиального раstra с пространственной частотой 10 мм^{-1} . Учитывая относительно большой средний диаметр раstra (150 мм), на который нанесены штрихи, и большое число штрихов (4800), с достаточной для практических целей точностью можно считать, что штрихи расположены параллельно в пределах длины ограничительной щели, т. е. с прямоугольным пропусканием. Для наклона штрихов ось диска перемещается по окружности оптической оси всей системы, в результате пространственная частота изменяется в пределах $0 \dots 10 \text{ мм}^{-1}$.

Пространственные частоты тест-объекта можно изменять от 5 до 100 мм^{-1} с помощью сменных линз 5, имеющих различные увеличения ($-0,5$; 1; 2; 4; $10\times$) и проецирующих решетку в плоскость ограничительной щели 6, расположенной в фокальной плоскости объектива 7 коллиматора.

Изображение решетки, освещаемой источником света 1 с помощью конденсора 2 и фильтра 3, созданное с помощью дополнительной линзы 5, объектива коллиматора 7 и контролируемого объектива 8, анализируется

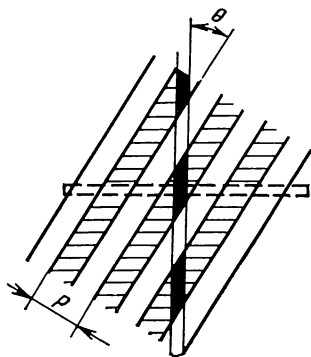


Рис. 162. Тест-объект устройства ЭРОС-100

щелью 9, расположенной перпендикулярно к ограничительной щели 6. Обе щели можно поворачивать на 90° для измерений в меридиональной и сагиттальной плоскостях контролируемого объектива. Чтобы обеспечить необходимую точность измерений, ширина b обеих щелей не должна превышать четверти периода максимальной пространственной частоты.

Периодические сигналы светового потока через щель 9 и собирающую линзу 10 поступают на фотокатод фотоумножителя 11, выходной сигнал с которого поступает на измерительное устройство в электронном усилителе 12 и на записывающее устройство 13. Измерения выполняют в центре поля контролируемого объектива и по полю.

При измерении ФПМ в различных точках поля входной зрачок контролируемого объектива совмещают с осью вращения поворотного устройства, а узел анализирующей щели и фотоумножителя смещают в поперечном направлении до появления изображения. При этом пространственные частоты изменяются в зависимости от угла поля: для сагиттального сечения

$$N'_s = \frac{Nf'_k}{f'_{об}} \cos \omega;$$

для меридионального сечения

$$N'_m = \frac{Nf'_k}{f'_{об}} \cos^2 \omega.$$

КПМ контролируемого объектива для всего диапазона пространственных частот прямо пропорционален амплитуде регистрируемого сигнала для каждой пространственной частоты. Так как изменение пространственных частот происходит плавно, то записывающее устройство 13 регистрирует кривую ФПМ в заданном диапазоне пространственных частот.

Для плавного изменения пространственных частот можно использовать радиальную миру. Пространственные частоты в радиальной мире вычисляют по формуле

$$N_i = \frac{m}{\pi D_i},$$

где D_i — диаметр окружности миры, на котором вычисляют пространственную частоту; m — число пар секторов миры.

При использовании радиальной миры в роли тест-объекта в устройствах, основанных на методе непосредственного сканирования, анализирующим элементом служит точечная диафрагма, так как вследствие сходимости штрихов миры возникает погрешность измерения, которая при больших частотах достигает 5 %. Применение малого отверстия для сканирования изображения уменьшает световой поток и тем самым затрудняет проведение точных измерений.

МЕТОД ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ФИЛЬТРОМ

Метод основан на разложении изображения тест-объекта на синусоидальные составляющие (гармоники) с помощью электрического фильтра. Для получения ОПФ спектр тест-объекта должен иметь как можно больше гармоник. Тест-объектами с такими спектрами являются узкая щель и пограничный тест (граница светлого и темного полей), содержащие гармоники с любой пространственной частотой. В целях получения периодических сигналов используют тест-объекты с рядом последовательно расположенных щелей или пограничных тестов, а также тест-объекты с одной щелью и одним пограничным тестом при их возвратно-поступательном движении относительно анализирующей щели [24].

В установках, основанных на этом методе, изменение пространственной частоты N происходит за счет изменения временной частоты f при постоянной частоте f_0 настройки электрического фильтра. Временная частота f равна произведению пространственной частоты N на скорость v перемещения тест-объекта, поэтому при изменении скорости v и при постоянной частоте настройки f_0 электрического фильтра будет изменяться пространственная частота $N_i = f_0/v_i$.

Схема устройства (рис. 163, а), реализующая рассматриваемый метод измерения ФПМ, включает тест-объект в виде решетки 1, состоящей из узких штрихов (щелей). Распределение яркости в решетке при контрасте, равном единице (рис. 163, б), имеет вид

$$L(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } kp - \frac{b}{2} < x < kp + \frac{b}{2}; \\ 0 & \text{при } kp + \frac{b}{2} < x < (k+1)p - \frac{b}{2}, \end{cases}$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

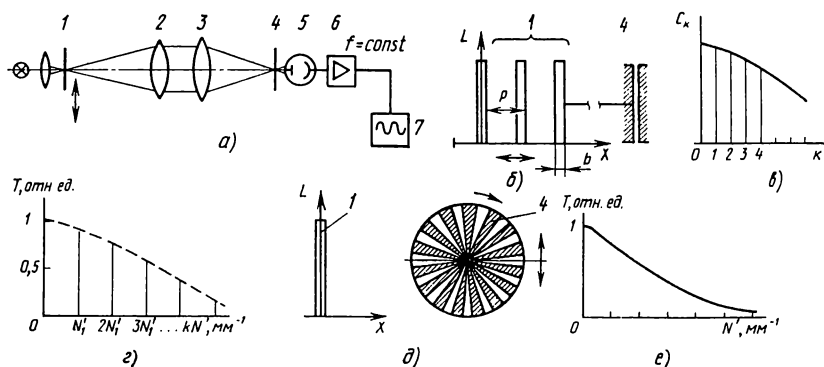


Рис. 163. Измерение ФПМ методом гармонического анализа:

а — схема устройства; б — тест-объект и анализатор для метода гармонического анализа электрическим фильтром; в — спектр амплитуд гармоник тест-объекта; г — изменение амплитуд гармоник; д — тест-объект и анализатор для метода гармонического анализа пространственным фильтром; е — график зависимости амплитуды первой гармоники от пространственной частоты

Эту функцию можно разложить в ряд Фурье

$$L(x) = \frac{d}{p} + \frac{2}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi b}{p}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi b}{p}\right) \cos\left(\frac{4\pi x}{p}\right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi b}{p}\right) \cos\left(\frac{6\pi x}{p}\right) + \dots \right].$$

Амплитуды C_k гармоник будут уменьшаться (рис. 163, в) согласно формуле спектра амплитуд:

$$C_k = 2 \frac{\sin(k\pi b/p)}{k\pi b/p}, \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

где k — номер гармоники, определяющий число гармоник, которые можно выделить из такой решетки. При $k = p/b$ амплитуда $C_k = 0$.

Пространственные частоты гармоник функции $L(x)$ равны N , $2N$, $3N$, ..., фазы равны нулю.

Решетка 1 (см. рис. 163, а), расположенная в фокальной плоскости коллиматорного объектива 2, перемещается со скоростью v перпендикулярно к оптической оси. Ее изображение, построенное контролируемым объективом 3, сканируется узкой щелью 4. Периодические световые сигналы, преобразованные фотоприемником 5 в электрические, поступают в усилитель 6 (электрический фильтр), настроенный на постоянную временную частоту $f_0 = N'_1 v = \text{const}$, или в анализатор гармоник — электронный прибор, позволяющий разложить периодическую функцию на отдельные синусоидальные составляющие с измерением их амплитуд. В первом варианте на выходе электрического фильтра образуется гармоника с временной частотой f_0 , а высшие гармоники отфильтровываются. Амплитуда указанной гармоники, отнесенная к постоянной составляющей электрического сигнала, пропорциональна КПМ для синусоидальной решетки с пространственной частотой N'_1 . Постоянная составляющая электрического сигнала должна быть одинаковой для всех пространственных частот. Изменение скорости v движения решетки приводит к изменению временной частоты f сигнала, поступающего на усилитель. Если усилитель настроен на частоту f_0 , то он пропустит гармонику с этой частотой. Например, при уменьшении скорости движения решетки в 2 раза через усилитель пройдет гармоника с временной частотой $f_0 = \frac{v}{2} 2N'$, т. е. амплитуда, регистрируемая самопишущим прибором 7, будет соответствовать амплитуде гармоники решетки с пространственной частотой $2N'_1$; при уменьшении скорости в 3 раза пройдет гармоника с пространственной частотой $3N'_1$ и т. д. Следовательно, для выделения гармоники с пространственной частотой $k N'_1$ необходима скорость движения решетки $v = f_0 / (k N'_1)$. Следует заметить, что при расчете и градуировке устройства необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие конечную ширину b решетки и сканирующей щели,

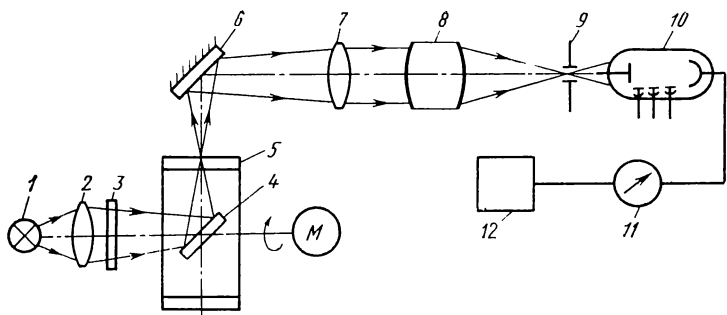


Рис. 164. Схема устройства ЮС-105 ГОИ им. С. И. Вавилова

а также изменение амплитуд гармоник согласно рис. 163, в. На рис. 163, г показан график ФПМ, измеренной по этому методу.

Рассмотренный метод позволяет получить дискретный ряд пространственных частот, определяемый разложением в ряд Фурье функции распределения яркости тест-объекта. Этот ряд можно расширить за счет изменения фокусного расстояния f'_k объектива коллиматора согласно формуле (94) и изменения периода p тест-объекта.

Для измерений ФПМ методом гармонического анализа электрическим фильтром разработан ряд устройств. Устройство ЮС-105, разработанное в ГОИ им. С. И. Вавилова (рис. 164), предназначено для измерения ФПМ объективов различного назначения с $f' = 10 \dots 1000$ мм и угловым полем до $\pm 70^\circ$. В комплект устройств входят сменные коллиматорные объективы с различными фокусными расстояниями и относительными отверстиями, сменные щели шириной 0,002; 0,004 и 0,01 мм и три сменные тест-объекта, выполненные в виде цилиндров различных диаметров, на внешнюю поверхность которых нанесены штрихи с пространственной частотой $N = 0,55; 1,1$ и $2,2$ мм $^{-1}$. Ширина штрихов на всех тест-объектах одинакова ($b = 0,02$ мм), число штрихов $m_1 = 180, 360, 720$. Таким образом, с помощью тест-объекта при $N = 0,55$ мм $^{-1}$ можно выделить 100 гармоник, при $N = 1,1$ мм $^{-1}$ — 50 и при $N = 2,2$ мм $^{-1}$ — 25 гармоник.

Для градуировки измерительной схемы используют безаберрационный объектив, значения коэффициентов передачи модуляции которого известны.

Установка (см. рис. 164) включает источник света 1, освещающий с помощью конденсора 2 и светофильтра 3 через зеркало 4 тест-объект 5 (решетка из узких параллельных штрихов прямоугольного профиля), расположенный в фокальной плоскости объектива 7 коллиматора. Тест-объект вращается электродвигателем с постоянной скоростью и может поворачиваться на угол 90° вокруг вертикальной оси для исследования объективов в меридиональном и сагиттальном направлениях. Изобра-

жение решетки проецируется через зеркало 6 контролируемым объективом 8 в плоскости анализирующей щели 9.

Световые периодические сигналы преобразуются фотоумножителем 10 в электрические и поступают на анализатор гармоник 12 электрического сигнала, с помощью которого выделяются гармоники и измеряются их амплитуды, пропорциональные КПМ соответствующих пространственных частот. Постоянную составляющую электрического сигнала измеряют микроамперметром 11.

Для исследования по полю контролируемый объектив 8 поворачивают совместно с анализирующей щелью 9 и фотоумножителем 10 относительно вертикальной оси, проходящей через входной зрачок контролируемого объектива.

Измерения КПМ и представление результатов происходит автоматически. Значения КПМ появляются на цифровом табло и печатаются на бумажной ленте с помощью электроуправляемой пишущей машины.

МЕТОД ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ФИЛЬТРОМ

Метод основан на разложении функции рассеяния объектива на синусоидальные составляющие с помощью пространственного фильтра т. е. на реализации математического выражения ОПФ как преобразования Фурье функции рассеяния объектива. В качестве тест-объекта используют точечную диафрагму или щель.

Физический смысл метода заключается в том, что распределение яркости в бесконечно удаленной светящейся точке (см. рис. 163, д) может быть представлено математически δ -функцией, спектр амплитуд преобразования Фурье которой имеет постоянное значение

$$\mathcal{F} \{ \delta(x, y) \} = \tilde{\delta}(N_x, N_y) \equiv 1.$$

Пропустив такой световой сигнал через контролируемый объектив и измерив амплитуды гармоник различных пространственных частот и их смещение по отношению к нулевой частоте, получим ОПФ как реакцию оптической системы на сигнал синусоидальной формы для различных пространственных частот.

В качестве пространственного фильтра применяют вращаемый секторный растр, который позволяет выделять любую пространственную частоту без изменения анализирующего устройства, или прямоугольный растр, с помощью которого сканируют изображение точечной диафрагмы, выделяя при этом различные пространственные частоты (см. рис. 163, д). Периодические световые сигналы после растра 4 (см. рис. 163, а) попадают на фотоприемник 5, где преобразуются в электрические. Для получения синусоидальных сигналов после фотоприемника устанавливают усилитель 6, настроенный на постоянную временную частоту

$$f = nm = \text{const},$$

где n — частота вращения раstra, об/с, m — число пар секторов раstra.

Радиальный растр на большом радиусе можно рассматривать как решетку с параллельными штрихами, учитывая малый размер пятна рассеяния и большое число секторов раstra. Функцию пропускания этой решетки

можно представить как функцию пропускания прямоугольной решетки с одинаковыми по ширине прозрачными и непрозрачными штрихами с пространственной частотой $N = m/(2\pi R)$, где R — радиус раstra, на который контролируемым объективом проецируется изображение бесконечно удаленной точечной диафрагмы (пятно рассеяния). Тогда амплитуда первой гармоники прямоугольной решетки на определенном радиусе раstra пропорциональна КПМ по синусоидальной мире.

Пространственная частота N изменяется при перемещении раstra перпендикулярно к оптической оси системы, в то время как временная частота остается постоянной. Таким образом, усилитель, выделяя первую гармонику периодических сигналов, при смещении раstra позволяет получить синусоидальные сигналы с переменной пространственной частотой.

Метод гармонического анализа изображения с помощью пространственного фильтра позволяет получить непрерывный спектр пространственных частот, не требует сложной электронной аппаратуры, легко обеспечивает автоматизацию измерения, а также измерение ФПФ. Кроме того, он позволяет создать универсальную установку для измерения f' , s_p и ОПФ.

Устройства для измерения ОПФ методом гармонического анализа пространственным фильтром выполняют как для прямого, так и для обратного хода лучей. Экспериментальное устройство Всесоюзного научно-исследовательского кинофотопланета (НИКФИ) предназначено для измерения ФПМ киносьемочных объективов и выполнено для обратного хода лучей (рис. 165), что обеспечивает получение больших пространственных частот при использовании радиальной миры с небольшим числом секторов, так как в этом случае

$$N = \frac{m}{2\pi R} \frac{f'_k}{f'_{об}}.$$

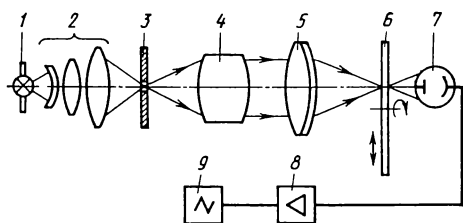


Рис. 165. Схема экспериментального устройства с радиальной мирой по методу непосредственного сканирования

Однако при этом требуется источник излучения большой мощности, так как используемая точечная диафрагма $З$ не должна превышать радиуса дифракционного пятна контролируемого объ-

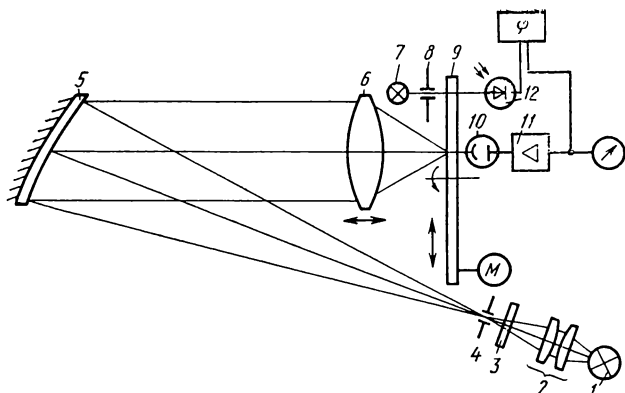


Рис. 166. Схема устройства для измерения ОПФ по методу пространственного фильтра

ектива 4 для обеспечения наименьшей погрешности в результатах измерения. Диафрагма 3, освещенная источником света 1 через конденсор 2, проецируется контролируемым объективом 4 и объективом 5 коллиматора в плоскость радиальной миры 6, вращающейся вокруг оси, параллельной оптической оси объектива и перемещающейся в перпендикулярном к ней направлении. Модулированный световой поток преобразуется фотоприемником 7 в электрические сигналы, которые поступают на вход усилителя 8. Частота модуляции постоянна, так как частота вращения раstra не изменяется. Пространственная частота N изменяется за счет перемещения изображения вдоль сектора миры.

На пленке шлейфового осциллографа 9 записывается значение амплитуды первой гармоники периодических сигналов в зависимости от радиуса, фиксирующего изображение точечной диафрагмы (см. рис. 163, е).

С радиальной мирой в роли пространственного фильтра в МВТУ им. Н. Э. Баумана разработано устройство, предназначенное для измерения ОПФ длиннофокусных объективов, применяемых в ближнем инфракрасном диапазоне спектра излучения. В схеме использован прямой ход лучей (рис. 166). Точечная диафрагма 4, расположенная в главном фокусе зеркального парабоида вращения, часть которого является коллиматорным объективом 5 (внеосевая парабола), освещена источником света 1 через конденсор 2 и светофильтр 3. Контролируемый объектив 6 создает изображение бесконечно удаленной светящейся точки (точечной диафрагмы) в виде пятна рассеяния в плоскости радиальной миры 9, вращающейся вокруг оси, параллельной оптической оси объектива.

Периодические световые сигналы, преобразованные на фотоприемнике 10 в электрические сигналы, поступают на вход усилителя 11, настроенного на частоту модуляции — частоту первой гармоники электрических сигналов. Амплитуда первой гармоники,

пропорциональная КПМ, регистрируется гальванометром. Шкала перемещения раstra проградуирована непосредственно в пространственных частотах.

ФПФ измеряют фазометром ϕ с помощью дополнительного устройства, вырабатывающего опорный сигнал на пространственной частоте, близкой к нулю. С опорным сигналом сравниваются сигналы на других пространственных частотах. ФПФ равна нулю на пространственной частоте $N = 0$.

Устройство для опорного сигнала состоит из источника света 7, диафрагмы 8 и фотодиода 12, преобразующего световые сигналы в электрические, поступающие на фазометр. Все элементы устройства опорного сигнала жестко связаны с растром, поэтому опорный сигнал, вырабатываемый фотодиодом, имеет постоянную фазу. Стрелочный прибор — фазометр ϕ показывает разность фаз опорного и выходного сигналов при относительном перемещении изображения диафрагмы вдоль сектора миры.

На точность измерения в схемах с прямым и обратным ходом лучей влияют сходимость штрихов радиальной миры в пределах площади пятна рассеяния, конечность размера точечной диафрагмы, погрешность определения плоскости изображения объектива, погрешность установки точечной диафрагмы в фокальной плоскости, непостоянство значения отношения толщины темного штриха (сектора) к светлому и частоты вращения раstra, погрешности отсчетных устройств и т. п.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОПФ

Точность измерения ОПФ определяется погрешностью метода измерения (методическая погрешность), погрешностями отдельных узлов устройства (инструментальные погрешности), а также несоблюдением условий проведения испытаний.

Методическая погрешность в основном определяется систематическими погрешностями и может быть учтена в процессе измерения. Систематические погрешности связаны с конечными размерами точечных и щелевых тест-объектов и анализаторов; ограничением числа штрихов периодического тест-объекта в момент измерения; переменной частотой в пределах пятна рассеяния, при использовании тестов с непрерывно изменяющейся пространственной частотой.

Инструментальная погрешность устройств определяется их конструкцией, т. е. погрешностями механических, оптических и электронных узлов.

Механические узлы должны быть изготовлены с высокой точностью, так как значение неучитываемой дефокусировки контро-

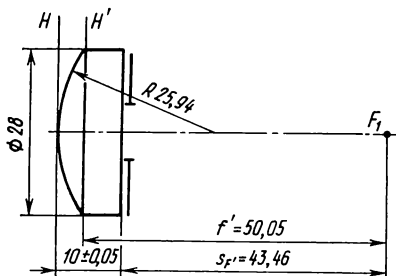


Рис. 167. Эталонный объект

лируемого объектива, равное $\pm 0,005$ мм, приводит к изменению КПМ на $\pm 0,01$.

Погрешности оптических компонентов, которые вносятся в изображение, создаваемое контролируемым объективом, должны быть минимальными. Например, суммарные волновые aberrации этих компонентов не должны превышать 0,1 волновой aberrации контролируемой системы.

К погрешностям электронных узлов относятся погрешности, вызванные непостоянством чувствительности, нелинейностью световых характеристик фотоприемников, нестабильностью характеристик усилителя и неточностью стрелочных измерительных приборов, а также нестабильностью выходных характеристик блоков питания и т. п. Точность измерений ОПФ, кроме указанных погрешностей, ограничивается побочным световым потоком. Ввиду сложности аналитического расчета погрешности оценка точности измерения ОПФ выполняется по результатам испытания эталонных объективов. Последние имеют простую конструкцию, поэтому погрешностями их изготовления можно пренебречь. В качестве эталонного объектива используют одиночную плоско-выпуклую линзу (рис. 167) с $f' = 50$ мм из стекла К8. Расхождения между измеренными значениями ОПФ и расчетными можно считать погрешностями измерительной установки.

1. **Афанасьев В. А.** Оптические измерения: Учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
2. **Витриченко Э. А.** Методы исследования астрономической оптики. М.: Наука, 1980. 152 с.
3. **Волосов Д. С.** Фотографическая оптика. Теория, основы проектирования, оптические характеристики. М.: Искусство, 1978. 543 с.
4. **Вычислительная оптика:** Справочник под общ. ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. — 423 с.
5. **Духопел И. И., Федина Л. Г.** Голографический интерферометр для контроля деформаций линз // Оптико-механическая промышленность, 1980, № 1. С. 17—20.
6. **Коломийцов Ю. В.** Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1976. 296 с.
7. **Креопалова Г. В., Пуряев Д. Т.** Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.
8. **Ландсберг Г. С.** Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
9. **Максутов Д. Д.** Изготовление и исследование астрономической оптики. 2-е изд. М.: Наука. 1984. 272 с.
10. **Мирошников М. М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1983. 696 с.
11. **Михельсон Н. Н.** Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
12. **Оптический производственный контроль.** Пер. с англ. Под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
13. **Проектирование оптических систем.** Пер. с англ./Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. 430 с.
14. **Пуряев Д. Т.** Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.
15. **Русинов М. М.** Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
16. **Справочник технолога-оптика/**Под общ. ред. С. М. Кузнецова и М. А. Окатова. Л.: Машиностроение, 1983. 414 с.
17. **Теория оптических систем.** Учебник для вузов/Б. Н. Бегунов, Н. П. Заказнов, С. И. Кирышин, В. И. Кузичев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 432 с.
18. **Шульман М. Я.** Измерения передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1980. 208 с.

А

- Аббе** метод 158
 — окуляр 24
 — принцип 77
 — рефрактомер 64, 65
Аберрация волновая 201, 217, 222
 — нормали 141
 — остаточная 150, 212
 — поперечная 213
 — продольная 214
Анизотропия 71
Апертура числовая 124
Асферичность 142

Б

- Бериллий** — Применение 57
Бесконечность практическая 228, 242
Болометр 48
Бэрча интерферометр 131

В

- Виды** поверхностей 109
Виньетирование 92

Г

- Гартмана** метод 151
 — постоянная 153
Гартманограмма 152
Гаусса окуляр 25
Глаз 42
Глобар 34
Гониометр 28
Граница раздела сред 109

Д

- Деформация** волнового фронта 110
Децентрировка 91
Диафрагма полевая 180
 — сканирующая 235
Диафрагменное число 21
Динаметр Рамсдена — см. *Рамсдена динаметр*
 — Чапского — см. *Чапского динаметр*
Дистория оптическая 215
 — фотограмметрическая 215

З

- Зеркало** астрономическое 147
 — главное 147
 — параболическое 22, 151
 — плоское 113, 116
 — сферическое 21, 117, 137
Зрочки микроскопа 185
 — телескопической системы 183
 — фотообъектива 185

И

- Измерения** косвенные 10
 — прямые 10
Интерферометр базовый 126
 — Бэрча см. *Бэрча интерферометр*
 — голографический 135
 — Коломийцова—Духопела — см. *Коломийцова—Духопела интерферометр*
 — Линника — см. *Линника интерферометр*
 — светосильный лазерный 123
 — сдвига 133
 — Тваймана—Грина — см. *Тваймана—Грина интерферометр*
 — Физо — см. *Физо интерферометр*
Источники излучения газоразрядные 37
 — для цветовых измерений 36
 — тепловые 34

К

- Качество** поверхности 109
Клин оптический 98, 101
Клиновидность 106
Коллиматор 19
Коломийцова—Духопела интерферометр 121
Кольца Ньютона — *Ньютона кольца* 87
Компенсатор универсальный 149
Контраст 208
Коэффициент виньетирования 192
 — дисперсии стекла 55
 — передачи контраста 208

— светопропускания 188
— светорассеяния 190
— Штреля — см. *Штреля коэф-
фициент*
Кривая пограничная 205
Кристаллы двуосные 72
— одноосные 72
— изотропные 72
Критерий качества изображения 201
— Рэлея — см. *Рэлея критерий*

Л

Лазеры 31
Лампы газоразрядные 37
— дуговые 37
— импульсные 40
— ксеноновые 39
— накаливания 35
— ртутные 38
Линза одиночная 19
Линника интерферометр 130
Лучепреломление двойное 71

М

Метод Аббе — см. *Аббе метод*
— автоколлимационный 61
— анаберрационных точек 143
— Гартмана — см. *Гартмана
метод*
— гониометрический 58, 73
— интерференционный 67
— колориметрический 196
— компенсационный 146
— контактный 142
— луча, нормально входящего 61
— луча, нормально выходящего 61
— механический 83
— наименьшего отклонения 58
— Обреимова — см. *Обреимова
метод*
— переналожения 120
— пробных стекол 113, 117
— рефрактометрический 63, 73
— секторного раstra 231
— теневой 136
— увеличений 156
— Фотоэлектрический 169
— Фуко — см. *Фуко метод*
— Фуко—Филбера — см. *Фуко—
Филбера метод*
Микроскоп автоколлимационный 24
— измерительный 25
Микрофотометр 239, 242
Мира радиальная 224
— штриховая 224
Монченко окуляр 25

Н

Наводка поперечная 11
— продольная 12, 15
Нернста штифт 34
Ньютона кольца 87

О

Обработка измерений 10
Обреимова метод 67, 75
Окуляр Аббе — см. *Аббе окуляр*
— автоколлимационный 22, 25
— Гаусса — см. *Гаусса окуляр*
— Монченко — см. *Монченко окуляр*
— Рамсдена — см. *Рамсдена окуляр*
Отрезки фокальные 162

П

Поверхность асферическая 109
— волновая 71
— второго порядка 141
— оптическая 109
— planoидная 141
Повышение чувствительности 16
Погрешность абсолютная 9
— астигматическая 112
— вероятная 9
— грубая 9
— зональная 112
— измерений 8
— инструментальная 8
— локальная 112
— местная 112
— общая 112
— остаточная 9
— относительная 9
— приборная 8
— систематическая 8
— случайная 8
— средняя квадратическая 9
Показатель преломления 55
Поле 181
Постоянная Гартмана (техническая) —
см. *Гартмана постоянная*
Прибор Юдина — см. *Юдина прибор*
Приемники излучения 42
— координатные 53
— пирозлектрические 48
— тепловые 46
— фотонные 49
Призма 98
Принцип Аббе — см. *Аббе принцип*
Пульфриха рефрактометр 64, 65
Пятно рассеяния 229, 233

Р

Рамсдена динаметр 184
— окуляр 23, 179

Распределение освещенности 194
— энергии 233
Расстояние рабочее 164
Растр секторный 230
Рефрактометр Аббе — см. *Аббе рефрактометр*
— Пульфриха — см. *Пульфриха рефрактометр*
Рэлея критерий 20

С

Система автоколлимационная 143
— углоизмерительная 103
Скамья оптическая 18
Сканирование непосредственное 246
Скорость фазовая 71
Способ автоколлимационный 89, 95
— интерференционный 85
— коллимационный 93
— максимальной модуляции 172
— поляризационный 82
— сканирующего анализатора 171
— сферометрический 84
Способность разрешающая 223
Стандарт яркости 41
Стекло кварцевое 57
— оптическое 55
— пробное 113, 117
Сферометр 84

Т

Тваймана—Грина интерферометр 126
Телескопическая система 176, 181, 217
Температура цветовая 37
Термоэлемент 47
Тест пограничный 205
Толщиномер 80
Толщины линз 77
Точность измерений 9
Трубки гейслеровские 40

У

Увеличение видимое 176
— линейное 180
— угловое 158

Ф

Физо интерферометр 115
Фильтр пространственный 254
— электрический 251

Фокусировка 12
Формула цветности 200
Фотодиод 51, 53
Фотокамера точная 227
Фотоматериал 44
Фотометр 199
Фоторезистор 54
Фототранзистор 54
Фотоэлектронный умножитель 51
Фотоэлемент 49
Френеля эллипсоид 71
Фуко метод 137
Фуко—Филбера метод 139
Функция модуляционная передаточная 208
— оптическая передаточная 207
— передачи модуляции 208
— передачи фазы 208
— рассеяния 203

Х

Характеристика частотно-контрастная 208
— частотно-фазовая 208
Характеристики геометрические 154
— качества изображения 201
— световые 187

Ц

Цветность фотографическая 196
Цветопередача 196

Ч

Чапского динаметр 184
Частота пространственная 207
Чувствительность наводок 11

Ш

Шаблон радиусный 83
Ширина интерференционной полосы 114
Штифт Нернста — см. *Нернста штифт*
Штреля коэффициент 204

Э

Эксцентриситет поверхности 141, 144
Эллипсоид Френеля — см. *Френеля эллипсоид*

Ю

Юдина прибор 179

| | |
|---|------------|
| Предисловие | 3 |
| Введение | 5 |
| Глава 1. Основы оптических измерений | 8 |
| 1. Погрешности измерений | 8 |
| 2. Чувствительность продольных и поперечных наводок | 11 |
| 3. Средства измерений | 18 |
| Оптические приборы и приспособления | 18 |
| Источники излучения | 31 |
| Приемники излучения | 42 |
| Глава 2. Измерение характеристик оптических материалов | 55 |
| 1. Основные оптические материалы и их характеристики | 55 |
| 2. Измерение показателей преломления и дисперсии оптического стекла | 57 |
| Гониометрические методы | 58 |
| Рефрактометрические методы | 63 |
| Интерференционный метод Обреимова | 67 |
| 3. Измерение показателей преломления кристаллов | 70 |
| Глава 3. Измерение и контроль конструктивных параметров оптических деталей | 77 |
| 1. Толщины оптических деталей | 77 |
| 2. Радиусы кривизны сферических поверхностей | 83 |
| 3. Измерение децентрировки и контроль центрировки линз и линзовых систем | 91 |
| 4. Измерение и контроль углов призм, клиньев и клиновидности пластин | 98 |
| Глава 4. Измерение и контроль формы оптических поверхностей | 109 |
| 1. Виды оптических поверхностей и их роль в формировании оптического изображения | 109 |
| 2. Контроль формы плоских поверхностей | 113 |
| Пробное стекло | 113 |
| Интерферометр Физо | 115 |
| 3. Контроль формы сферических поверхностей | 117 |
| Пробное стекло | 117 |
| Интерферометры для бесконтактного контроля сферических поверхностей диаметром до 250 мм | 120 |
| Интерферометр ИТ-172 | 122 |
| Светосильный лазерный интерферометр | 123 |
| Базовый интерферометр ИКАП-2 | 126 |
| Интерферометры с рассеивающей пластиной | 130 |
| Интерферометры сдвига | 133 |
| Голографические интерферометры | 135 |
| Теневые приборы | 136 |
| 4. Контроль формы асферических поверхностей | 140 |
| Краткая характеристика асферических поверхностей | 140 |
| Контактные методы контроля формы АП | 142 |
| Метод анаберрационных точек для контроля формы отражающих асферических поверхностей второго порядка | 143 |
| Компенсационный метод | 146 |
| Интерференционный контроль астрономических зеркал | 147 |
| Метод Гартмана | 151 |

| | |
|---|------------|
| Глава 5. Измерение и контроль основных характеристик оптических приборов | 154 |
| 1. Типовые оптические системы и их характеристики | 154 |
| 2. Измерение фокусных расстояний объективов и линз | 155 |
| Метод увеличения | 156 |
| Метод Аббе | 158 |
| Метод угловых измерений | 160 |
| 3. Измерение фокальных отрезков | 162 |
| 4. Измерение рабочих расстояний | 164 |
| Визуальный метод | 165 |
| Фотографический метод | 166 |
| Интерференционный метод | 168 |
| Фотоэлектрический метод | 169 |
| 5. Измерение увеличений, полей и диаметров входных и выходных зрачков типовых оптических систем | 175 |
| Измерение увеличений типовых оптических приборов | 175 |
| Измерение поля типовых оптических систем | 180 |
| Измерение диаметров и положений входных и выходных зрачков оптических систем | 183 |
| 6. Измерение световых характеристик оптических приборов | 187 |
| Измерение коэффициента пропускания | 188 |
| Измерение коэффициента рассеяния | 190 |
| Измерение коэффициента виньетирования фотографических объективов | 192 |
| Измерение распределения освещенности по полю фотографического объектива | 194 |
| Определение цветопередачи фотографических объективов | 196 |
| Глава 6. Измерение и контроль характеристик качества изображения оптических приборов | 201 |
| 1. Критерии качества оптического изображения | 201 |
| Функция рассеяния | 203 |
| Пограничная кривая | 205 |
| Оптическая передаточная функция | 207 |
| 2. Измерение остаточных aberrаций | 212 |
| Измерение сферической aberrации объективов | 212 |
| Измерение дисторсии объективов | 214 |
| Измерение волновых aberrаций объективов и телескопических систем | 217 |
| 3. Измерение разрешающей способности | 223 |
| 4. Измерение параметров пятна рассеяния | 229 |
| Измерение диаметра пятна рассеяния | 230 |
| Измерение распределения энергии в пятне рассеяния контролируемого объектива | 233 |
| Измерение распределения освещенности в пятне рассеяния методом сканирующей щели | 234 |
| Определение параметров пятна рассеяния методом сканирования точечной диафрагмой | 235 |
| 5. Измерение пограничной кривой | 240 |
| 6. Измерение оптической передаточной функции | 243 |
| Метод непосредственного сканирования | 246 |
| Метод гармонического анализа электрическим фильтром | 251 |
| Метод гармонического анализа пространственным фильтром | 254 |
| Точность измерения ОПФ | 257 |
| Список литературы | 259 |
| Предметный указатель | 260 |

