



ТАРТУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА ФОТОМЕТРИЯ

Практикум по оптике

V

ТАРТУ 1990

ТАРТУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра общей физики

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА ФОТОМЕТРИЯ

Практикум по оптике

V

Составитель П. Парис

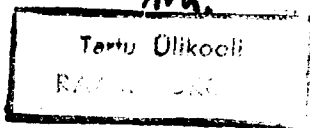
Перевод с эстонского О. Манкин

Тарту 1990

Утверждено на заседании совета физико-химического факультета ТУ 21 февраля 1990 года.

KUSTUTATAGÜ

Arh.



10921

ПРАКТИКУМ ПО ОПТИКЕ У.
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ФОТОМЕТРИЯ.
Составитель Пеэтер П а р и с.
На русском языке.
Тартуский университет.
ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Юликооли, 18.
Ответственный редактор Х. Окс.
Подписано к печати 27.02.1990.
Формат 60x84/16.
Бумага писчая.
Машинопись. Ротапринт.
Условно-печатных листов 5,12.
Учетно-издательских листов 4,78. Печатных листов 5,5.
Тираж 295.
Заказ № 128.
Цена 15 коп.
Типография ТУ, ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Тийги, 78.

Введение

Настоящий сборник руководств к практическим работам по оптике предназначен для студентов второго курса физического отделения. Руководствами могут, однако, пользоваться также студенты химического, математического и биологического отделений при условии некоторого сокращения или упрощения заданий.

Сборник представляет собой дополненное и исправленное повторное издание ранее опубликованных руководств. При подготовке сборника к изданию предусматривалось объединить в нем практические работы по разделу геометрической оптики. Дополнительно в сборник включена одна работа по фотометрии. При составлении настоящих руководств были использованы три ранее опубликованных сборника руководств к практикуму по оптике.*

В руководствах этого сборника не приводится форма таблиц для оформления результатов измерений. Каждый студент должен найти сам наиболее подходящую форму таблицы и представить результаты измерений и вычислений в этой форме. При всех измерениях обязательна оценка погрешности эксперимента.

Теоретический обзор, приводимый в руководствах, отвечает приблизительно минимуму знаний, необходимых для осмысленного выполнения работы и в том случае, когда на лекциях этот материал еще не излагался. Это дает возможность рассматривать некоторые разделы программы только в рамках практикума. Материал, указанный в списке литературы, приводимой в конце каждого руководства, позволяет глубже изучить данный раздел и найти ответы на вопросы, поставленные в конце руководства.

Составитель

-
- * 1. Rammo J. Optika praktikum: Kiirteoptika. - Tartu: TRÜ, 1976. - I. - Lk. 4-15, 33-38, 61-70.
2. Paris P., Voolaid H. Optika praktikum: Geomeetriline optika. Fotomeetria. - Tartu: TRÜ, 1979. - IV.-Lk. 1-55.
3. Teral H. Füüsika praktikumi tööjuhendid mittefüüsikutele: Optika. - Tartu: TRÜ, 1984. - III. - Lk. 5-20.

I. ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Оптические методы измерений позволяют определять значения физических величин с очень большой точностью: например, длину световой волны с точностью до $0,01 \text{ \AA}$, показатели преломления сред с точностью до 10^{-15} и т.д. Такая большая точность возможна только потому, что оптические детали измерительных установок изготовлены также с очень большой точностью и приборы тщательно юстируются. Так, например, поверхность высококачественных линз отличается от сферической не более, чем на $0,005 \%$, а показатель преломления стекла в пределах линзы изменяется максимально на $\pm 0,0001$. В фотообъективе линзы центрируются с точностью до $\pm (0,01-0,02) \text{ мм}$.

Но даже высококачественный прибор не гарантирует большой точности измерений, если он недостаточно хорошо отрегулирован. Так, например, можно при нахождении неизвестной длины световой волны сделать ошибку в $6-7 \%$, если не устранить параллакс монохроматора. В результате этого может оказаться, что мы приписали данной спектральной линии длину волны, фактически отвечающую совсем другому цвету.

Из вышеизложенного ясно, насколько важна регулировка (юстировка) измерительных приборов. Хотя требования юстировки различных приборов и неодинаковы, можно привести некоторые общие приемы юстировки, применимые ко всем оптическим системам: получение изображения, свободного от параллакса, установка гониометра, освещение спектрального прибора, установка зеркальных поверхностей перпендикулярно к оптической оси и т.п.

I.I. Получение изображения, свободного от параллакса

I.I.I. Задание

Ознакомление с параллаксом и получение изображения, свободного от параллакса.

1.1.2. Принадлежности

Оптическая скамья, линза, источник света, указатели, вогнутое зеркало.

1.1.3. Ход работы

1.1.3.1. Введение

При оптических измерениях часто приходится определять положение изображения относительно указателя измерительного прибора или самого объекта (например, при калибровке монохроматора, в работе с гониометром, при исследовании сферических зеркал и т.д.). Если изображение не лежит в одной плоскости с объектом сравнения, его можно видеть, как в месте нахождения указателя, так и по обе стороны от него, в зависимости от расположения глаза наблюдателя. Это явление называется параллаксом, а происходящая от него погрешность — параллактической погрешностью.

Сущность параллакса позволяет выявить рисунок 1.1. На рисунке указатель находится в точке А, а изображение в точке В.

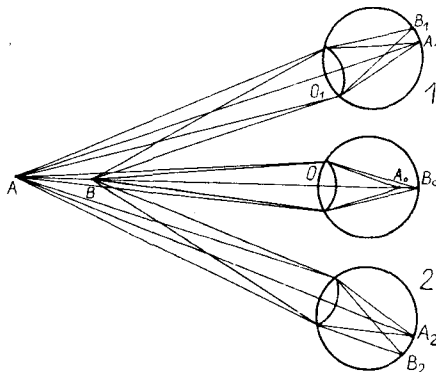


Рис. 1.1. Возникновение параллакса.

Если глаз наблюдателя находится на прямой АВ, то он видит указатель и изображение совмещенными. Если наблюдатель перенесет глаз в положение I, то возникает изображение B_I

справа от изображения указателя A_1 . В положении глаза 2, наоборот, возникает изображение объекта B_2 слева от изображения указателя A_2 .

Величину параллакса характеризует угол, вершина которого находится в центре зрачка, а стороны проходят через точки А и В. Этот угол ε называют параллактическим углом. Он выражается следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{b \sin \alpha}{R}$$

где b - расстояние между точками А и В, R - расстояние середины стрелка b от зрачка и α - угол между b и R .

Изображение, свободное от параллакса, можно наблюдать только одним глазом. Если рассматривать изображение и указатель двумя глазами, то будет мешать т.н. бинокулярный параллакс [I].

1.1.3.2. Эксперимент

I. Убеждаются в наличии бинокулярного параллакса.

II. Для получения изображения, свободного от параллакса, используют установку, изображенную на рис. 1.2.

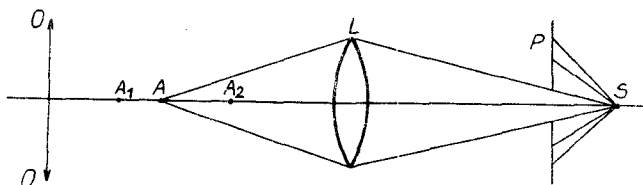


Рис. 1.2. Схема опыта для нахождения изображения, свободного от параллакса.

Перед источником света S располагается щель P , изображение которой наблюдают. Если указатель A , находится в одной плоскости с изображением щели, параллакс отсутствует, т.е. при перемещении глаза перпендикулярно к направлению зрения (в направлении OO') изображение щели не перемещается относительно указателя. Если указатель находится в положении A_1 или A_2 , параллакс наблюдается. Для получения изображения, свободного от параллакса, можно переместить указатель A относительно неподвижных линзы и щели или переместить линзу

относительно неподвижных указателя и щели.

Работу можно выполнять и с помощью вогнутого зеркала. Для этого помещают перед вогнутым зеркалом, установленным на оптической скамье, укрепленный на подвижном штативе указатель. Перемещением указателя находят его такое положение, при котором острие указателя и его перевернутое изображение совпадают без параллакса.

Найдя с помощью линзы или вогнутого зеркала изображение, свободное от параллакса, показывают его преподавателю для проверки.

В протоколе приводят схему опыта.

I.2. Установка гониометра

I.2.1. Задание

Установка гониометра.

I.2.2. Принадлежности

Гониометр, плоскопараллельная стеклянная пластинка, источник света.

I.2.3. Ход работы

I.2.3.1. Введение

Гониометр является прибором для измерения углов, а в практикуме он применяется при исследовании призм и дифракционных решеток (см. приложение I.1). Гониометры могут использоваться и как спектроскопы, следовательно требования, предъявляемые к их установке, относятся и к спектроскопам. Принципиальная схема гониометра приведена на рис. I.3.

Гониометр считается установленным, если:

- 1) видно резкое изображение креста нитей зрительной трубы;
- 2) зрительная труба установлена на бесконечность;
- 3) щель коллиматора находится в его фокальной плоскости (т.е. из коллиматора выходит пучок параллельных лучей);
- 4) оптические оси коллиматора и зрительной трубы перпендикулярны к оси вращения столика;
- 5) щель и вертикальная нить креста окуляра параллельны оси вращения столика.

Только при выполнении этих условий в гониометре полу-

чается высококачественное изображение и максимальная точность измерений.

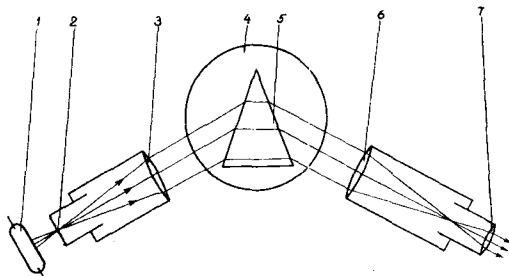


Рис. 1.3. Схема гониометра.

1 – источник света; 2 – щель коллиматора; 3 – объектив коллиматора; 4 – столик; 5 – исследуемая призма; 6 – объектив зрительной трубы; 7 – окуляр зрительной трубы.

1.2.3.2. Установка гониометра

1. Фокусировка окуляра на крест и зрительной трубы на бесконечность.

Сначала фокусируют окуляр на крест, что делается поворотом окуляра. При повороте окуляр перемещается относительно креста.

Затем фокусируют зрительную трубу на бесконечность. В случае простых гониометров для этого следует привести зрительную трубу на какой-нибудь далекий объект (находящийся практически в бесконечности). Фокусировку производят изменением расстояния между окуляром и объективом. Изображение должно быть свободно от параллакса в отношении креста.

Лучшие гониометры снабжены так называемым окуляром Гаусса (см. рис. 1.4). Внешняя линза 5 окуляра подвижна относительно стекла 3 с нанесенным на него крестом. Крест освещается лампочкой 1 с помощью стеклянной пластинки 4.

Если зрительная труба установлена на бесконечность и крест отчетливо виден, то крест находится в фокусе объектива и лучи, исходящие из всех его точек, при выходе из объектива параллельны между собой. Если эти лучи направить обратно в объектив так, чтобы они были по-прежнему парал-

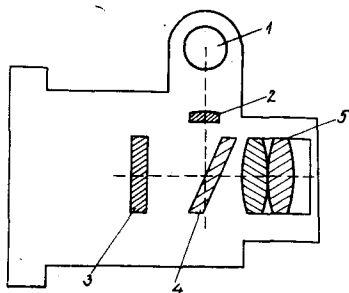


Рис. 1.4. Схема окуляра Гаусса.

лельны, то изображение креста образуется также в фокальной плоскости объектива. Это изображение называется автоколлимационным.

Следовательно для установки зрительной трубы на бесконечность надо на пути лучей, выходящих из объектива, поставить плоское зеркало или плоскопараллельную стеклянную пластинку, от которых лучи отразятся обратно в объектив. Если крест и его автоколлимационное изображение будут одновременно отчетливо видны без параллакса, то первое задание будет выполнено.

II. Установка оптической оси зрительной трубы перпендикулярно к оси вращения столика.

Для этого помещают плоскопараллельную стеклянную пластинку на столик так, чтобы ее поверхность была перпендикулярна прямой, направленной к одному из установочных винтов, так как в этом случае можно изменять наклон столика с помощью только одного установочного винта. Затем поворачивают зрительную трубу (или столик со стеклянной пластинкой) так, чтобы вертикальная нить креста и ее отраженное изображение совпали. Для совмещения горизонтальных нитей изменяют наклон столика (или зрительной трубы).

Поворачивают столик на 180° . Если и теперь горизонтальные нити крестов перекрываются, то оптическая ось зрительной трубы действительно перпендикулярна к оси вращения столика. В противном случае для достижения перекрытия половинку поправки делают изменением наклона зрительной трубы, дру-

гую половину изменением наклона столика.

Снова поворачивают столик на 180° и приводят ранее описанным способом к совпадению крест и его изображение. Регулировку повторяют до тех пор, пока поворот на 180° уже не вызовет несовпадения креста и его изображения.

Теперь располагают плоскопараллельную пластинку на столике так, чтобы ее плоскость была перпендикулярна прямой, соединяющей другие установочные винты. Проверяют, выполняется ли и при таком положении условие перпендикулярности. При необходимости повторяют вышеописанную операцию регулировки.

III. Приведение щели в фокус объектива коллиматора.

Чтобы установить щель в фокусе объектива коллиматора, помещают перед щелью источник света и наблюдают через зрительную трубу лучи, выходящие из коллиматора. Если щель находится в фокусе объектива коллиматора, то из коллиматора выходит параллельный пучок лучей и в зрительную трубу, установленную на бесконечность, видно резкое изображение щели. Следовательно, для нахождения нужного положения щели надо перемещать ее до тех пор, пока в зрительную трубу не будет видно резкое, без параллакса, изображение щели. Важно! Изображение щели нельзя сфокусировать с помощью окуляра зрительной трубы! В таком случае зрительная труба не будет установлена на бесконечность и придется повторить предыдущую часть работы.

IV. Установка оптической оси коллиматора перпендикулярно к оси вращения столика.

Проверяют параллельность щели и вертикальной нити креста. Если они не параллельны, достигают параллельности поворотом щели. Для установки оси коллиматора перпендикулярно к оси вращения столика уменьшают симметрично высоту щели с помощью диафрагмы и наклоняют (с помощью соответствующего винта) коллиматор так, чтобы горизонтальная нить креста разделила изображение щели пополам.

Приглашают руководителя практикума проверить состояние гониометра. В протокол вносят схему гониометра, приемы его установки и отсчет по лимбу, при котором вертикальная нить креста находится в середине изображения щели коллиматора. (см. приложение I.2).

1.3. Освещение спектрального прибора

1.3.1. Задание

Установка источника света на оптической оси на соответствующем расстоянии от входной щели и получение свободного от параллакса изображения спектральной линии.

1.3.2. Принадлежности

Монохроматор УМ-2, источник света, спектральная лампа, конденсор, металлическая линейка.

1.3.3. Ход работы

1.3.3.1. Введение

Световой поток, проходящий через спектральный прибор, зависит от характера освещения щели. Чтобы полностью использовать светосилу и разрешающую способность прибора, надо, чтобы свет от всех точек щели целиком заполнял коллиматор. Это условие может быть выполнено, если источник света однороден, достаточно велик и его можно расположить на достаточно близком расстоянии от щели. Если эти условия невыполнимы, следует воспользоваться конденсором, который должен удовлетворять известным геометрическим связям, которые можно найти по рисунку 1.5.

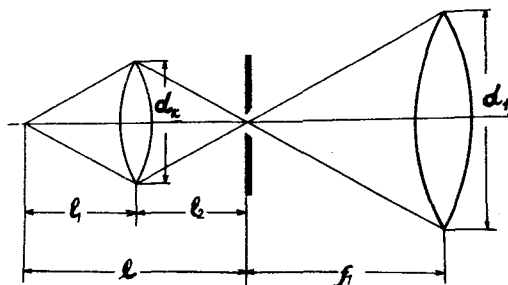


Рис. 1.5. Освещение щели с помощью конденсора.

На рис. 1.5 d_1 и f_1 суть диаметр и фокусное расстояние объектива коллиматора, d_k - диаметр конденсора. Если

источник света находится от щели на расстоянии ℓ и мы хотим спроецировать его на щель с увеличением β , то фокусное расстояние применяемого для этого конденсора можно найти из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_2} &= \frac{1}{f_k} \\ \frac{\ell_2}{\ell_1} &= \beta \\ \ell_1 + \ell_2 &= \ell \end{aligned} \right\}.$$

Решив эту систему уравнений, получим:

$$f_k = \frac{\beta \ell}{(\beta + 1)^2}.$$

Диаметр конденсора найдем из условия, чтобы светом был заполнен весь коллиматор. Для этого надо, чтобы

$$\frac{d_k}{\ell_2} = \frac{d_1}{f_1}.$$

Если выбрать $\beta = 1$, то $\ell_1 = \ell_2 = \frac{\ell}{2}$, а $f_k = \frac{\ell}{4}$ и $\frac{d_k}{f_k} = \frac{2d_1}{f_1}$, т.е. относительное отверстие конденсора должно быть по меньшей мере в два раза больше относительного отверстия коллиматора.

Объектив коллиматора не является ахроматической линзой (ему свойственна хроматическая аберрация), следовательно его фокусное расстояние зависит от длины световой волны. При других длинах волн изображение щели будет возникать либо впереди, либо позади этой плоскости.

Указанное обстоятельство не позволяет, однако, точно определить местоположение спектральной линии, так как начинает мешать параллакс. Чтобы избавиться от него, делают объектив коллиматора подвижным, т.е. его можно перемещать вдоль оптической оси. При калибровке монохроматора указатель зрительной трубы освещают через светофильтры светом цвета наблюдаемой спектральной линии и находят такое положение объектива коллиматора, при котором спектральная линия видна в месте указателя без параллакса.

1.3.3.2. Установка источника света на оптической оси монохроматора в соответствующем месте.

Относительное отверстие коллиматора в монохроматоре УМ-2 равно $1/6$. Следовательно относительное отверстие конденсора должно быть не меньше $1/3$. Допустим, например, что используется конденсор, фокусное расстояние которого $f_k = 94$ мм. Находят его относительное отверстие. Если оно окажется равным или больше $1/3$, определяют l_1 , l_2 и l при условии, что $f = 1$. Источник света ставят на расстоянии l от входной щели монохроматора.

Установка источника света на оптическую ось монохроматора производится следующим образом. С помощью диафрагм делают ширину входной щели равной $0,5$ мм и высоту ее равной $0,5$ мм. Выходную щель открывают максимально. Наблюдая через монохроматор, перемещают лампу перпендикулярно оптической оси пока она не будет видна в центре поля зрения. Это значит, что источник света находится на оптической оси.

Теперь устанавливают конденсор на расстоянии l_2 от входной щели. При этом в плоскости щели должно возникнуть резкое изображение источника света. При надобности перемещают конденсор перпендикулярно оптической оси, пока изображение источника света не окажется посередине входной щели.

Заменяют выходную щель зрительной трубой и увеличивают высоту входной щели до 1 см. На место прежнего источника света ставят спектральную лампу и зажигают ее. Поворотом барабана монохроматора совмещают какую-нибудь спектральную линию с указателем. Зажигают лампу подсветки указателя и подбирают соответствующий светофильтр. Проверяют отсутствие параллакса при наблюдении спектральной линии в плоскости указателя. При наличии параллакса, ликвидируют его перемещением объектива коллиматора с помощью специального винта.

В протокол вносят показание шкалы (учесть нониус!). Приглашают преподавателя проверить выполненное и записывают в протокол приемы установки источника света в соответствующее положение.

1.4. Литература

1. Мартин Л. Техническая оптика. - М.: ТИСИЛ, 1960. - Гл. IV.
2. Шилловский А.А. Прикладная физическая оптика. - М.: Физматгиз, 1961. - Гл. 2, § 6.
3. Зейдель А.Н., Островский Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. - М.: Наука, 1972. - Гл. V, § 2.

Приложение I.1

Описание устройства гониометра

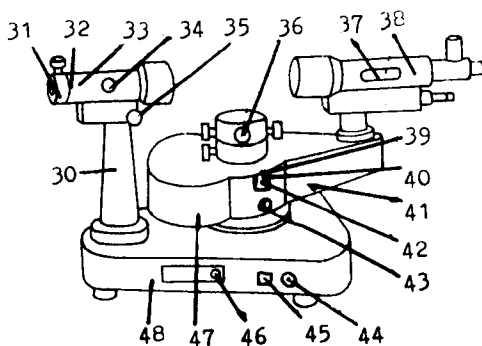


Рис. I.6. Общий вид гониометра со стороны коллиматора.

30 - стойка коллиматора, 31 - щель, 32 - кольцо, 33 - коллиматор, 34 - винт для фокусировки коллиматора, 35 - винт для изменения наклона коллиматора, 36 - винт для установки столика, 37 - шкала, 38 - зрительная труба, 39-40 - фиксатор лимба, 41 - алидада, 42 - механизм, соединяющий лимб с алидадой, 43 - винт для поворота лимба, 44 - выключатель, 45 - штепсельное гнездо, 46 - переключатель, 47 - осветитель, 48 - основание.

Основными частями гониометра являются зрительная труба 38, коллиматор 33, основание 48 с осевым механизмом и столик 54 (рис. I.7), зрительная труба и отсчетный микроскоп на вращающемся кронштейне, с которым жестко соединена алидада 4I. Алидаду и зрительную трубу, вращающиеся относительно лимба, поворачивают вручную, для точной регулировки имеется винт 6I, который работает только при зажатом фиксаторе 59.

Лимб можно поворачивать относительно алидады и столика с помощью микрометрического винта 58 (при фиксированном вспомогательном винте).

Перед калибровкой гониометра надо установить его в горизонтальном положении по уровню 57 с помощью винтовых ножек.

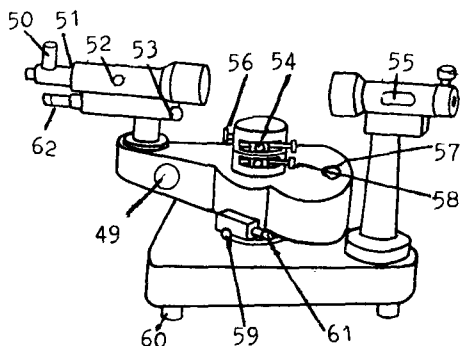


Рис. I.7. Общий вид гониометра со стороны зрительной трубы.

49 - винт оптического микрометра, 50 - осветитель, 51 - кольцо, 52 - винт для фокусировки зрительной трубы, 53 - винт для изменения наклона зрительной трубы, 54 - столик, 55 - шкала, 56 - винт, 57 - уровень, 58 - микрометрический винт для поворота лимба вместе со столиком, 59 - фиксатор, 60 - винтовая ножка, 61 - микрометрический винт для поворота алидады (при зажатом фиксаторе 59), 62 - отсчетный микроскоп.

Приложение I.2

Снятие отсчета по шкале гониометра

Поле зрения отсчетного микроскопа приведено на рис. I.8. В левом окне (рис. I.8,а) видны диаметрально противоположные отрезки лимба и вертикальный неподвижный штрих (индекс N), в правом окне (рис. I.8,б) – шкала оптического микрометра с горизонтальным индексом E .

Для снятия отсчета приводят вертикальную нить креста зрительной трубы в середину изображения щели и фиксируют алидаду с помощью винта 59. Затем вращают винт оптического микрометра 49 до тех пор, пока в поле зрения микроскопа, в левом окне не совместятся верхние и нижние двойные штрихи лимба. Теперь число градусов получается как первое число левее индекса N , число десятков минут равно числу интервалов между числом целых градусов и числом, отличающимся от него на 180^0 (в нижней половине шкалы). Число минут отсчитывают в левом ряду правого окна, число секунд – в правом ряду правого окна по горизонтальному индексу E .

Наименьшее деление шкалы микрометра равно $1''$, но разрешающая способность зрительной трубы равна $3''$, поэтому нет возможности измерять углы более точно.

Отсчет по шкале, приведенной на рисунке I.8, равен $13^0 43' 35''$.

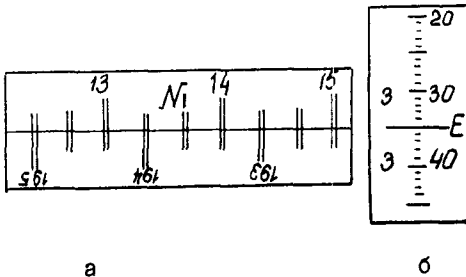


Рис. I.8. Поле зрения микроскопа.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗЫ И КАРДИНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Задание

Определить фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линзы и кардинальные элементы оптической системы.

2.2. Принадлежности

Оптическая скамья, рейтеры, собирающая линза, рассеивающая линза, оптическая система, осветитель, белый экран.

2.3. Ход работы

2.3.1. Теоретические основы

Для успешного выполнения работы надо предварительно знать правила знаков и формулу линзы (см. литер. [1]).

Оптической системой называется комплект оптических деталей (линзы, зеркала, призмы и т.д.), с помощью которого можно получить изображения предметов в приемнике света (глаз, фотоэлемент и т.п.), или установка, трансформирующая исходящие из источников пучки света.

В настоящей работе рассматриваются центрированные оптические системы, состоящие только из линз.

Как показывает теория, в центрированных оптических системах можно найти изображение без детального рассмотрения хода лучей. Достаточно знать так называемые кардинальные элементы системы.

Рассмотрим оптическую систему, с первой преломляющей поверхностью L_1L_1 и последней L_2L_2 (рис. 2.1). Оптической осью системы является прямая $A_1O_1O_2A_2$; это воображаемая линия, проходящая через центры кривизны всех преломляющих поверхностей. Такая система имеет следующие кардинальные элементы.

А. Фокусы оптической системы F_1 и F_2 .

Это точки, в которых собираются лучи, входящие в оптическую систему параллельно ее оптической оси, или продолжения этих лучей после выхода из системы. Плоскости, проходящие через фокусы и перпендикулярные оптической оси называются **фокальными плоскостями**.

Б. Главные точки оптической системы H_1 и H_2 .

Передней (H_1) и задней (H_2) главными точками оптической системы называют точки пересечения главных плоскостей с осью системы. Для нахождения главных плоскостей надо продолжить луч B_1C_1 , входящий в систему параллельно оптической оси, и луч D_1F_1 , выходящий из системы, до их пересечения в точке K_1 . Аналогично находится и точка K_2 . Плоскости, проходящие через точки K_1 и K_2 и перпендикулярные оптической оси системы, называют ее главными плоскостями. Главные плоскости изображают друг друга с линейным увеличением $\beta = +1$. Расстояния между главными точками и фокусами $F_1H_1 = f_1$ и $F_2H_2 = f_2$ называют **фокусными расстояниями** системы. Если по обе стороны системы находится одна и та же среда, то $f_1 = f_2$.

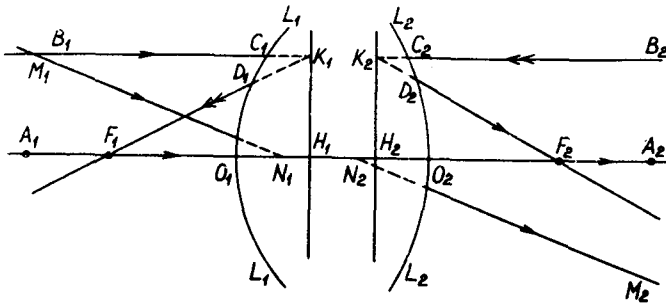


Рис. 2.1. Кардинальные элементы оптической системы.

В. Узловые точки оптической системы N_1 и N_2 .

Среди лучей, падающих на оптическую систему, может находиться и луч M_1N_1 , сопряженный с которым луч N_2M_2 параллелен лучу M_1N_1 . Точки пересечения продолжений

этих лучей с оптической осью (N_1 и N_2) называются узловыми точками системы. Для этих лучей угловое увеличение $\gamma = +1$. Плоскости, проходящие через узловые точки и перпендикулярные оптической оси, называются узловыми плоскостями.

Если по обе стороны системы имеется одна и та же среда, то узловые точки совпадают с главными точками.

Вышеприведенные шесть точек и шесть плоскостей и являются кардинальными элементами системы.

Если известны фокусы и главные плоскости системы, то изображение находится аналогично нахождению изображения в случае линзы. Это иллюстрирует рис. 2.2.

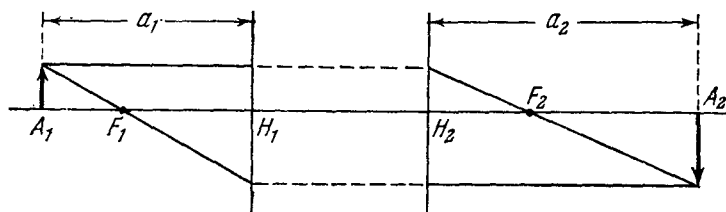


Рис. 2.2. Нахождение изображения в оптической системе.

Легко показать, что расстояние предмета от передней главной плоскости $-a_1^*$, расстояние изображения от задней главной плоскости a_2 и фокусное расстояние системы f_2 удовлетворяют соотношению

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f_2}. \quad (2.1)$$

На практике нередко встречаются случаи, когда размеры системы в направлении оптической оси значительно меньше

* Согласно правилу знаков отсчет длин отрезков по оси начинают от точек пересечения оси и оптической системы и считают их положительными, если направление отсчета совпадает с направлением распространения света. Относительно правила знаков см. литер. [3].

фокусного расстояния. В таком случае смещение луча при прохождении через систему мало, т.е. точки C_1 и D_1 , а также C_2 и D_2 (рис.2.1) практически совпадают. Также совпадают в таком случае и передняя и задняя главные плоскости и находятся в середине системы. Такую систему называют тонкой линзой. Формула (2.1) выполняется и в случае тонкой линзы, только расстояния $-a_1$, a_2 и f_2 отсчитываются от центра линзы.

2.3.2. Методы измерений

В настоящей работе определяются фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линзы, а также фокусные расстояния и главные плоскости оптической системы. Измерения производятся на оптической скамье, по которой могут перемещаться рейтеры с линзами и экраном. Объектом, изображение которого получают, является прозрачная шкала с осветителем.

2.3.2.1. Нахождение фокусного расстояния тонкой собирающей линзы.

Имеется много возможностей для нахождения фокусного расстояния собирающих линз. В настоящей работе рассматриваются две из них.

I. При нахождении фокусного расстояния используется формула линзы (2.1). Для этого находят при различных расстояниях $-a_1$ между объектом и линзой соответствующие расстояния a_2 между возникающим на экране изображением и линзой. Измерения производят как при увеличенном, так и при уменьшенном изображении для каждого положения не менее трех раз. Находят средние значения a_2 и чертят график в осях $1/a_1$, $1/a_2$. Полученная прямая пересекает оси в точках, отвечающих значениям $1/f_1$ и $1/f_2$.

II. Фокусное расстояние собирающей линзы можно определять также с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность. Для этого вместо экрана на оптическую скамью ставят зрительную трубу и перемещением линзы находят изображение. В этом случае фокусное расстояние линзы равно расстоянию между линзой и объектом. (Почему? Вспом-

ните установку гониометра!) Измерения следует повторить не менее трех раз и взять среднее полученных результатов.

2.3.2.2. Нахождение фокусного расстояния тонкой рассеивающей линзы.

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы несколько сложнее, так как в этом случае возникает не действительное, а мнимое изображение. Эту трудность можно преодолеть, воспользовавшись вспомогательной собирающей линзой.

Вначале ставят на оптическую скамью только собирающую линзу и находят резкое изображение объекта в положении экрана S_1 (см. рис. 2.3).

Затем ставят позади собирающей линзы рассеивающую линзу. Изображение в результате этого сместится в положение S_2 . Сделав также отсчет положения рассеивающей линзы, можно найти расстояния a_1 и a_2 .

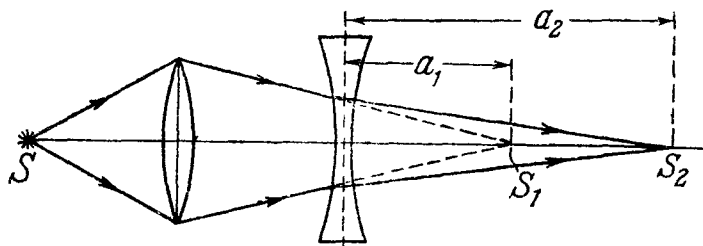


Рис. 2.3. Нахождение фокусного расстояния рассеивающей линзы.

Измерения производят при различных положениях рассеивающей линзы (в каждом положении не менее трех измерений). Найдя средние значения a_1 и a_2 , строят график в осях $1/a_1$, $1/a_2$ и находят фокусные расстояния рассеивающей линзы.

Фокусное расстояние рассеивающей линзы можно определить также с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность. В случае, если изображение S_1 , даваемое собирающей линзой, совпадает с передним фокусом рассеивающей линзы (у

рассеивающей линзы передний фокус находится позади линзы), изображение S_2 возникает в бесконечности, т.е. из линзы выходит пучок параллельных лучей. Параллельность лучей можно проверить с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность. Зная местоположение фокуса (в данном случае S_1) и самой рассеивающей линзы, легко найти ее фокусное расстояние.

2.3.2.3. Определение кардинальных элементов оптической системы.

В настоящей работе используется следующий метод нахождения кардинальных элементов оптической системы. Допустим, что предмет с линейными размерами y находится на расстоянии $-x_1$ от переднего фокуса F_1 . Если линейные размеры изображения будут $-y_1$ (см. рис. 2.4), то линейное увеличение

$$\beta_1 = \frac{y_1}{y} = - \frac{f_1}{x_1}. \quad (2.2)$$

Если переместить предмет на расстояние $-x_2$ от переднего фокуса, то линейное увеличение

$$\beta_2 = \frac{y_2}{y} = - \frac{f_1}{x_2}. \quad (2.3)$$

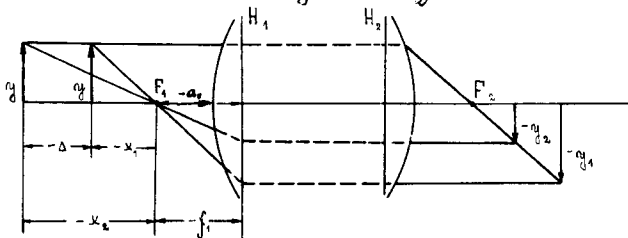


Рис. 2.4. Определение кардинальных элементов оптической системы.

Из формул (2.2) и (2.3) можно найти фокусное расстояние

$$f = \frac{\Delta}{\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2}}, \quad (2.4)$$

где $\Delta = x_2 - x_1$.

Для нахождения фокусного расстояния системы по формуле (2.4) надо определить линейные увеличения системы при двух разных положениях объекта и расстояние между ними. С целью получения большей точности следует выбрать Δ таким, чтобы линейные увеличения β_1 и β_2 отличались значительно. Измерения следует повторить не менее трех раз и взять среднее полученных результатов.

Для нахождения положения главных плоскостей системы недостаточно только знания ее фокусных расстояний, надо знать еще положение фокуса. Для этого используется опять зрительная труба, установленная на бесконечность, как это описано в п.п. 2.3.2.1 и 2.3.2.2. Искомая главная плоскость находится от найденного фокуса на расстоянии, равном фокусному расстоянию, в сторону системы. Главные плоскости могут находиться как внутри, так и вне системы.

2.3.3. Эксперимент

Перед тем, как приступить к измерениям, устанавливают оптические оси линз параллельно оси оптической скамьи. В случае линз с небольшой оптической силой это делается на глаз. Фокусировка изображения также производится на глаз.

Используемые в работе линзы не исправлены в отношении хроматической аберрации, поэтому результаты измерений будут более точными, если перед источником света поставить светофильтр.

I. Определяют фокусные расстояния собирающей линзы обоими методами, описанными в п. 2.3.2.1. Производят оценку погрешности измерений.

Расстояния $-a_1$ и a_2 находят по показаниям шкалы. Для получения правильных результатов объект совмещают с началом шкалы и проверяют совпадение центра линзы и плоскости экрана с указателями рейтеров, в которых они укреплены.

Для этого используется специальный дальномер, который держат горизонтально одним концом в упор к объекту, а к другому концу осторожно придвигают середину линзы. Затем сравнивают отсчет по шкале с длиной дальномера. После этого поворачивают линзу на 180° и повторяют измерение. Если результаты измерений отличаются от длины дальномера не более,

чем на 2 мм, то можно не делать поправки при измерении расстояния.

Аналогично проверяют и правильность показаний указателя рейтера, несущего экран.

II. Определяют фокусные расстояния рассеивающей линзы обоими методами, описанными в п. 2.3.2.2. Перед этим опять-таки проверяют правильность положения линзы относительно указателя рейтера. Производят оценку погрешности измерений.

III. Определяют фокусное расстояние и положение фокусов и главных точек оптической системы способом, описанным в п. 2.3.2.3.

Расстояние $-a_1$ (см. рис. 2.4) определяют с помощью металлической линейки и дальномера, для определения расстояния между внешними преломляющими поверхностями системы, пользуются дальномером.

Чтобы определить увеличения, надо измерить длину изображения отрезка шкалы и разделить ее на длину этого отрезка (наименьшее деление шкалы равно 1 мм).

По результатам вычислений строят (в соответствующем масштабе) схему расположения кардинальных элементов данной оптической системы.

2.4. Вопросы

1. Дайте определение кардинальных элементов оптической системы.
2. Каковы правила знаков, используемые в геометрической оптике?
3. Выведите формулу (2.1).
4. Почему нельзя установить зрительную трубу на бесконечность через оконное стекло?
5. Как можно без вспомогательных средств установить, является ли линза собирающей или рассеивающей?
6. Объясните понятия "ход лучей" и "построение изображения".

2.5. Литература

1. Наав А. Оптика. - Tartu: TRU, 1973. - I. - Лк. 29-73.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1973. - III. - §§ 8-12.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ И ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

3.1. Задание

Определить радиус кривизны R и фокусное расстояние f выпуклого и вогнутого зеркала. Убедиться в постоянстве суммы $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}$.

3.2. Принадлежности

Оптическая скамья с измерительной линейкой, рейтеры, выпуклое, вогнутое и плоское зеркало, три стержня, заостренных с одного конца, стержень известной длины (дальномер).

3.3. Ход работы

3.3.1. Теоретические основы

У сферических зеркал отражающей (зеркальной) поверхностью является часть сферической поверхности. У вогнутых зеркал – это внутренняя, у выпуклых – внешняя поверхность сферы.

Внешним контуром сферического зеркала обычно является окружность. Лучи, выходящие из центра сферы и касающиеся внешнего контура зеркала, образуют конус, ограничивающий часть пространства. Чем меньше образованный этим конусом телесный угол, тем более резкое изображение может дать сферическое зеркало. В последующем изложении предполагается, что этот угол мал.

Радиус сферы, образующей зеркальную поверхность, называют радиусом кривизны зеркала. Обозначим его через R . Согласно правилу знаков будем считать радиус кривизны положительным, если центр сферы лежит правее сферической поверхности, и отрицательным при противоположном их расположении. При этом предполагается, что свет падает на зеркало слева. Следовательно радиус кривизны зеркала,

изображенного на рис. 3.1, отрицателен. Длины отрезков, нанесенных на рисунки, считают всегда положительными. Поэтому на рисунках перед всеми отрицательными величинами стоит знак минус.

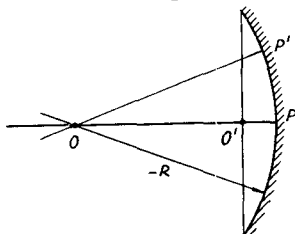


Рис. 3.1. Вогнутое зеркало.

Центр сферы O называется центром кривизны зеркала. Прямая, проходящая через центр кривизны O и центр внешнего контура зеркала O' , называется оптической осью зеркала. Точку пересечения оси с зеркалом (точка P) называют полюсом (или вершиной) зеркала. Любая прямая, проходящая через центр кривизны, но не проходящая через полюс зеркала P (например, прямая OP'), называется вспомогательной осью (рис. 3.1).

В отличие от линз, ограниченных сферическими преломляющими поверхностями, все оси сферических зеркал равноценны и в случае зеркал с произвольными внешними контурами неразличимы. Лучи, исходящие из светящейся точки, расположенной на некоторой оптической оси зеркала, после отражения в нем пересекаются в точке, лежащей на этой же оси.

При выводе формулы сферического зеркала исходят из уравнения параксиальных лучей:

$$\frac{n_2}{a_2} - \frac{n_1}{a_1} = \frac{n_2 - n_1}{R}, \quad (3.1)$$

где n_1 и n_2 суть показатели преломления первой и второй среды соответственно (см. рис. 3.2), R — радиус кривизны разделяющей среды сферической поверхности, a_1 — расстояние объекта и a_2 — изображения от полюса сферической поверхности. Формула (3.1) применима и в случае отражения света, если сделать замену $n_2 = -n_1$. Тогда

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{2}{R}, \quad (3.2)$$

что и является формулой сферического зеркала.

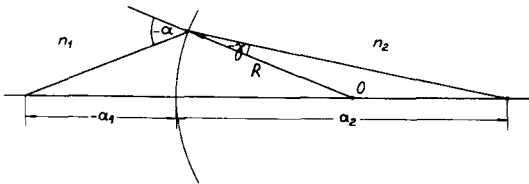


Рис. 3.2. Преломление луча на одной сферической поверхности.

При пользовании формулой (3.2) надо иметь в виду, что в соответствии с правилом знаков расстояния отсчитываются от полюса сферического зеркала и считаются отрицательными, если они направлены влево, и положительными, если они направлены вправо от отражающей поверхности.

Например, если при помощи вогнутого зеркала, изображенного на рис. 3.1, получается действительное изображение предмета, расположенного перед зеркалом, то все величины в формуле (3.2) отрицательны. Если с помощью этого же зеркала получается мнимое изображение (находящееся позади зеркала), то a_2 положительно.

Лучи, падающие параллельно оптической оси, после отражения от вогнутого зеркала собираются в фокусе F , расстояние которого от зеркала называется фокусным расстоянием и обозначается буквой f .

Если в формуле (3.2) положить $a_1 = -\infty$, то

$$a_2 = f = \frac{R}{2}. \quad (3.3)$$

Формулу (3.2) можно теперь записать в виде

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}. \quad (3.4)$$

В этой формуле знак величин f совпадает со знаком радиуса кривизны R .

Приближение светящейся точки к зеркалу ведет к увеличению расстояния до изображения ($-a_2$). Если $a_1 = R$, то и $a_2 = R$, т.е. лучи, исходящие из центра кривизны зеркала, после отражения от него собираются снова в центре кривизны.

Если $a_1 = f$, то $a_2 = \pm \infty$, т.е. изображение источника света, находящегося в фокусе, возникает на бесконечно большом расстоянии от зеркала.

Если $|a_1| > |f|$, то $a_2 > 0$, т.е. если светящаяся точка находится между фокусом и зеркалом, то возникает ее мнимое изображение за зеркалом.

3.3.2. Эксперимент

3.3.2.1. Определение радиуса кривизны вогнутого зеркала.

На оптическую скамью помещают с помощью рейтеров остроконечный стержень A и вогнутое зеркало так, чтобы стержень находился перед зеркалом, а острие его, направленное вверх, было на оптической оси зеркала (см. рис. 3.3). Острие освещают лампочкой сбоку так, чтобы свет от лампочки не падал на зеркало. Рейтер перемещают по оптической скамье

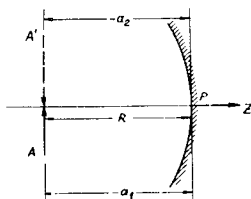


Рис. 3.3. Определение радиуса кривизны вогнутого зеркала.

до тех пор, пока острие и его перевернутое изображение не совпадут. Смотреть следует на соответствующем расстоянии в направлении острия и зеркала. Совпадение должно быть без параллакса, т.е. при перемещении глаза перпендикулярно к оптической оси не должно наблюдаться видимого смещения острия и его изображения друг относительно друга. Расстояние между стержнем A и полюсом зеркала определяют по из-

мерительной линейке. Для этого вносят в протокол отсчеты положения рейтеров (по их указателям) стержня Z_A и зеркала Z_P и вычисляют $a_1 = a_2 = R$. При этом имеют в виду, что расстояние между зеркалом и острием нельзя определять, как просто разность $Z_P - Z_A$.

В общем случае плоскость, перпендикулярная оси оптической скамьи и содержащая полюс зеркала (или острие), не совпадает с параллельной ей плоскостью, проходящей через точку отсчета по указателю соответствующего рейтера. Поэтому расстояние между указателями рейтеров не является расстоянием между самими оптическими деталями. Для точного определения этого расстояния применяют специальный дальномер. Дальномер представляет собой металлический стержень, заостренный с обоих концов, длина l_0 которого известна. Стержень этот укреплен на ручке, которая находится посередине стержня и перпендикулярна к нему. При измерениях дальномер устанавливается параллельно оси оптической скамьи и к его остриям осторожно подводят детали, расстояние между которыми определяют. В таком положении расстояние между ними равно l_0 . Обозначив расстояние, измеренное в этом положении по указателям рейтеров, через l_1 , получают поправку $\Delta l = l_0 - l_1$, которую прибавляют (с учетом ее знака) к расстояниям определенным по указателям рейтеров, чтобы получить истинное значение расстояния между точками оптической системы.

Такие поправки в данной работе делают при определении всех расстояний (например, между полюсом зеркала и острием, между полюсом сферического зеркала и плоским зеркалом и т.д.).

3.3.2.2. Определение фокусного расстояния вогнутого зеркала.

В опыте пользуются двумя остроконечными стержнями, которые помещают с помощью рейтеров на оптическую скамью так, чтобы острия находились на оптической оси вогнутого зеркала. При этом стержни располагают так, чтобы острие первого из них (А) находилось между центром кривизны и фокусом зеркала в таком положении, чтобы возникло в 2-3 раза увели-

ченное его изображение A' (рис. 3.4).

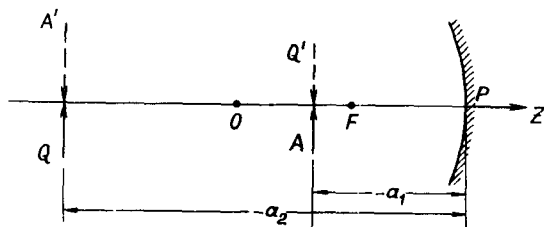


Рис. 3.4. Определение фокусного расстояния вогнутого зеркала.

Второй стержень Q помещают так, чтобы его острие совпало с изображением A' первого. Совпадение должно быть без параллакса, т.е. при перемещении глаза перпендикулярно к оптической оси не должно наблюдаться видимого смещения острия и изображения друг относительно друга. В таком случае второй стержень Q расположен так, что острие его перевернутого изображения Q' совпадает с острием стержня A . Затем по указателям рейтеров определяют координаты стержней Z_Q и Z_A и полюса зеркала Z_P и вносят их в таблицу. По этим данным вычисляют расстояния a_1 и a_2 , приняв в расчет поправки.

Опыт повторяют еще по меньшей мере два раза, убеждаясь в постоянстве суммы

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$$

и вычисляют фокусное расстояние.

Данные опыта и результаты вычислений оформляют в виде таблицы.

3.3.3.3. Определение расстояния до мнимого изображения.

Если светящаяся точка находится между вогнутым зеркалом и его фокусом, то в зеркале возникает мнимое изображение, находящееся позади зеркала; расстояние a_2 до изображения в формулу (3.4) войдет со знаком плюс. Положение мнимого изображения можно определить с помощью плоского зеркала B (рис. 3.5). Последнее надо поставить перед вогнутым

зеркалом так, чтобы его отражающая поверхность была перпендикулярна к оси вогнутого зеркала, а верхний край его находился в горизонтальной плоскости, проходящей через эту ось.

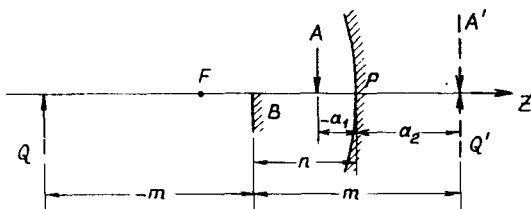


Рис. 3.5. Определение расстояния до мнимого изображения.

Объектом служит стержень A , укрепленный острием вниз в кольцеобразной рамке. Рамку со стержнем помещают с помощью рейтера на оптическую скамью так, чтобы острие стержня пришлось между вогнутым зеркалом и его фокусом.

Перед плоским зеркалом B ставят второй стержень Q острием вверх и перемещают зеркало B до тех пор, пока мнимое изображение Q' острия второго стержня не совпадет с мнимым изображением A' острия первого стержня. Совпадение должно быть без параллакса.

Теперь определяют по указателям рейтеров координаты острий z_Q и z_A и координаты зеркал z_B и z_P и вносят их в таблицу.

Вычисляют (с учетом поправки) расстояние m между плоским зеркалом B и острием Q (расстояние BQ). Длина этого отрезка, как это явствует из рис. 3.5, по абсолютному значению равна длине BQ' . Вычисляют также расстояние n между плоским зеркалом и полюсом вогнутого зеркала и расстояние $-a_1$ острия A от полюса вогнутого зеркала. Так как $BQ = BQ' = m$, то соответственно с рисунком $m = n + a_2$, откуда

$$a_2 = m - n,$$

где $n > 0$.

Результаты наблюдений и вычислений оформляют в виде таблицы.

Опыт повторяют по меньшей мере при трех различных положениях острия A .

3.3.3.4. Определение радиуса кривизны выпуклого зеркала.

Так как в выпуклом зеркале возникает всегда мнимое изображение, то его нельзя находить непосредственно.

Используется вертикальный стержень A , острие которого является одновременно объектом для выпуклого и плоского зеркала (см. рис. 3.6). Стержень располагают перед выпуклым зеркалом так, чтобы он проходил через оптическую ось зеркала. При правильном расположении зеркала и стержня сам стержень, его изображение и полюс зеркала находятся в одной плоскости. Плоское зеркало помещают между стержнем и выпуклым зеркалом так, чтобы его верхний край находился в горизонтальной плоскости, проходящей через полюс выпуклого зеркала. Плоское зеркало перемещают по оптической скамье до тех пор пока не исчезнет параллакс между изображениями стержня в плоском и выпуклом зеркале.

Изображение, даваемое выпуклым зеркалом, по величине меньше изображения, даваемого плоским зеркалом.

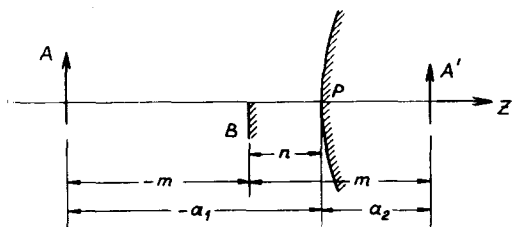


Рис. 3.6. Определение радиуса кривизны и фокусного расстояния выпуклого зеркала.

Теперь определяют по указателям рейтеров координаты острия (\bar{z}_A) и зеркал, плоского и выпуклого (\bar{z}_B и \bar{z}_P) и вносят их в таблицу. По этим данным (с учетом поправки) вычисляют расстояние a_1 острия от выпуклого зеркала, расстояние n между зеркалами и расстояние m между острием и плоским зеркалом.

Расстояние мнимого изображения от выпуклого зеркала

$a_2 = m - n$. Из рис. 3.6 можно видеть, что m , как расстояние мнимого изображения от плоского зеркала, положительно. Это расстояние по абсолютному значению равно расстоянию между острием A и плоским зеркалом. Значения расстояния a_2 находят при трех разных положениях стержня A относительно выпуклого зеркала.

Данные оформляют в виде таблицы и вычисляют значения радиуса кривизны и фокусного расстояния зеркала.

При всех опытах оценивают погрешность измерений.

3.4. Вопросы

1. Назовите некоторые применения сферических зеркал.
2. Какие преимущества имеют сферические зеркала перед сферическими линзами в отношении образования изображения?

3.5. Литература

1. Наав А. Оптика. - Tartu: TRÜ, 1973. - I. - Лк. 25-42.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - С. 277-294.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1973. - III. - § II.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ УВЕЛИЧЕНИЯ

4.1. Задание

Конструирование моделей зрительных труб Кеплера и Галилея. Опытное определение увеличений, даваемых ими, и сравнение этих результатов с вычисленными значениями.

4.2. Принадлежности

Оптическая скамья, набор выпуклых и вогнутых линз, рейтер, источник света с наблюдаемым объектом, экран, вспомогательная зрительная труба, металлическая линейка.

4.3. Ход работы

4.3.1. Теоретические основы

Для успешного выполнения работы необходимо знание следующих понятий и принципов: ход лучей в зрительной трубе и микроскопе, телескопическая оптическая система, угловое и линейное увеличение (см. литер. [1] - [3]).

Рассмотрим кратко устройство и принцип работы зрительных труб Кеплера и Галилея, а также микроскопа и выведем формулы для вычисления увеличения этих приборов. При выводе формул предполагается, что глаз наблюдателя сфокусирован на бесконечность.*

4.3.1.1. Зрительная труба Кеплера (астрономическая).

В зрительной трубе Кеплера задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. В таком случае парал-

* В действительности это может быть не всегда так, поскольку глаз можно сфокусировать в промежутке $10 \text{ см} - \infty$. Этим обуславливается разница практического и теоретического значения увеличения.

лельный пучок лучей, входящий в объектив, остается параллельным и после выхода из окуляра (см. рис. 4.1).

Допустим, что пучок параллельных лучей падает в объектив под углом φ_1 и выходит из окуляра под углом φ_2 к оптической оси прибора. В таком случае угловое увеличение зрительной трубы

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}. \quad (4.1)$$

Ширина пучка лучей, входящих в объектив, D_1 , определяется диаметром объектива, ширина же пучка, выходящего из окуляра, D_2 , определяется изображением входного отверстия (оправы объектива). Из рис. 4.2 можно видеть, что

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (4.2)$$

и

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (4.3)$$

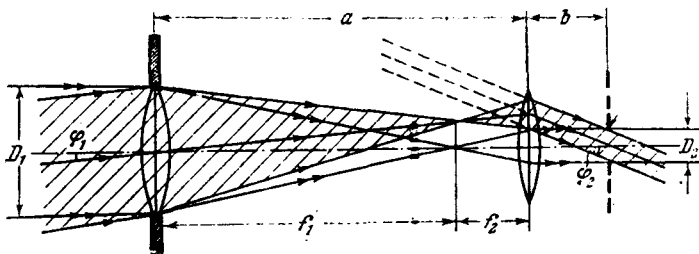


Рис. 4.1. Ход лучей в зрительной трубе Кеплера.

Из соотношений (4.1), (4.2) и (4.3) вытекает:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}. \quad (4.4)$$

4.3.1.2. Зрительная труба Галилея.

Если в астрономической зрительной трубе собирающий окуляр заменить рассеивающим, получится Галилеева зрительная труба, дающая прямое изображение объекта (см. рис.4.2). В зрительной трубе Галилея расстояние между объективом и окуляром равно разности фокусных расстояний объектива и окуляра (точнее - их алгебраической сумме). Можно показать, что и к зрительной трубе Галилея применима формула (4.4).

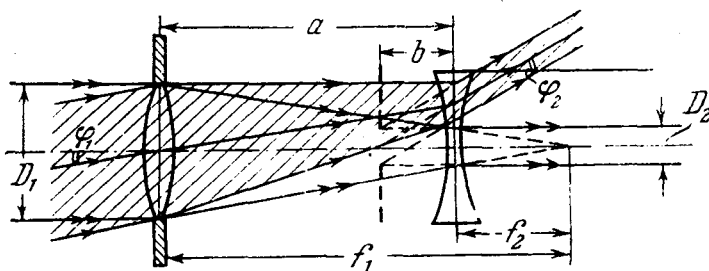


Рис. 4.2. Ход лучей в зрительной трубе Галилея.

4.3.1.3. Микроскоп.

Рассмотрим ход лучей в микроскопе, показанный на рис.

4.3.

При рассмотрении объекта через микроскоп угол зрения φ_2 определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{l'}{f_2} = \frac{bl}{af_2}, \quad (4.5)$$

где l - линейный размер объекта, а l' - соответствующий линейный размер изображения, даваемого объективом.

При рассмотрении этого объекта невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения ($L = 25$ см) угол зрения φ_1 таков, что

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{l}{L}. \quad (4.6)$$

Таким образом, увеличение микроскопа

$$K = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{b \Delta}{a f_2}. \quad (4.7)$$

Формулу (4.7) можно привести к виду:

$$K = \frac{L \Delta}{f_1 f_2}, \quad (4.8)$$

где $\Delta = s - (f_1 + f_2)$ - т.н. оптическая длина тубуса.

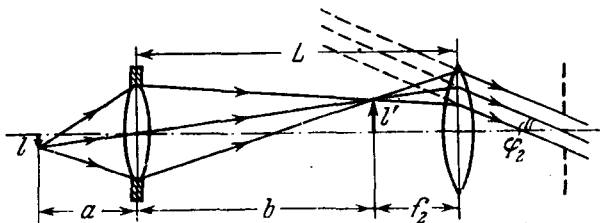


Рис. 4.3. Ход лучей в микроскопе.

Здесь следует еще раз подчеркнуть, что полученные формулы для вычисления увеличения выведены в предположении, что глаз наблюдателя сфокусирован на бесконечность.

4.3.2. Эксперимент

4.3.2.1. Подготовка к измерениям.

Для любой оптической системы очень важно прежде всего хорошо центрировать все входящие в нее линзы. В случае плохой центровки лучи могут сильно отклониться от оптической оси и вовсе не попасть в глаз наблюдателя.

В настоящей работе особенно важна юстировка линз по высоте, поскольку в горизонтальной плоскости юстировку обеспечивает оптическая скамья. Юстировку в вертикальном направлении проводят следующим образом.

Перед окном осветителя помещают прозрачную миллиметровую шкалу, которая и в дальнейшем будет служить наблюдаемым объектом. Придвигают вплотную к осветителю полупрозрачный экран с горизонтальным штрихом и регулируют высоту экрана так, чтобы этот штрих оказался на уровне среднего штриха миллиметровой шкалы, расположенной перед окном

осветителя. Затем отводят рейтер с экраном в противоположный конец оптической скамьи, ставят на оптическую скамью между осветителем и экраном собирающую линзу и находят такое ее положение, при котором на экране получается резкое изображение миллиметровой шкалы. Высоту линзы подбирают так, чтобы изображение среднего штриха миллиметровой шкалы совпало со штрихом на экране. Перемещая линзу и экран, проверяют это совпадение при других положениях линзы и экрана.

Затем ставят на оптическую скамью другую линзу (собирающую или рассеивающую, смотря по надобности) и регулируют ее высоту тоже так, чтобы изображение среднего штриха шкалы совпало со штрихом на экране.

В силу несовершенства рейтеров и держателей центры линз оказываются несколько смещенными и в горизонтальном направлении. В данном опыте это не существенно, так как объектами являются горизонтальные штрихи.

Для получения лучшего качества изображения линзы должны быть расположены перпендикулярно оптической оси. Это проверяют на глаз, поворачивая стержень держателя линзы в гнезде рейтера.

При моделировании зрительной трубы надо, чтобы в нее падал параллельный пучок лучей. Для этого помещают объект в фокус собирающей линзы; такую установку называют коллиматором.

Для юстировки коллиматора пользуются вспомогательной зрительной трубой, предварительно установленной на бесконечность (см. руководство к работе "Юстировка оптических измерительных приборов"). Перед сборкой коллиматора надо отрегулировать и высоту вспомогательной зрительной трубы. Методику этой регулировки следует выработать самостоятельно.

Для моделирования оптических приборов необходимо знать фокусные расстояния используемых линз. Фокусные расстояния собирающих линз можно определить с достаточной для этой работы точностью следующим образом. Линзу помещают позади коллиматора и находят такое положение экрана, при котором на нем получается резкое изображение объекта. Расстояние от линзы до экрана и будет приблизительно равно

фокусному расстоянию линзы.

Определение фокусного расстояния рассеивающих линз см. в руководстве к работе "Определение фокусного расстояния линзы и кардинальных элементов оптической системы".

4.3.2.2. Моделирование зрительной трубы Кеплера и определение ее увеличения.

Из имеющихся линз собирают зрительную трубу Кеплера с заданным (преподавателем) увеличением. Увеличение вычисляют по формуле (4.4), зная фокусные расстояния линз. Объектив собираемой зрительной трубы помещают вблизи коллиматора, окуляр же располагают на таком расстоянии от объектива, чтобы ход лучей через зрительную трубу был телескопическим. Нахождение правильного положения окуляра облегчается знанием расстояния между линзами $a = f_1 + f_2$ (см. рис. 4.1). Параллельность лучей, выходящих из окуляра, проверяют с помощью вспомогательной зрительной трубы, установленной на бесконечность: при правильном положении окуляра в зрительную трубу видно резкое изображение объекта. В случае необходимости надо уточнить расстояния между объективом и окуляром.

Теперь можно определить увеличение полученной зрительной трубы, измерив диаметр объектива (D_1) и диаметр его изображения, возникающего в окуляре (D_2). Для этого помещают позади окуляра экран, на котором изображение объектива получается в виде круглого светлого пятна.

Изображение объектива на экране получается конечно только в том случае, когда весь объектив заполнен светом. Если диаметр коллиматора меньше диаметра объектива, то для определения величины D_2 помещают позади объектива (вплотную к нему) лист белой бумаги и измеряют диаметр светлого пятна на нем. Увеличение вычисляют по формуле (4.4).

Увеличение зрительной трубы можно найти и по формуле (4.1). Для этого надо определить угол φ_1 , под которым виден объект невооруженным глазом, и угол φ_2 , под которым он виден в зрительную трубу. Для определения этих углов помещают позади окуляра вспомогательную зрительную трубу, установленную на бесконечность. В поле зрения теперь видно изо-

бражение шкалы. С помощью микрометра на окуляре вспомогательной зрительной трубы измеряют расстояние l_2 между двумя крайними штрихами шкалы. Ясно, что $l_2 = k \operatorname{tg} \varphi_2$, где k — коэффициент, характеризующий увеличение вспомогательной зрительной трубы. После этого удаляют с оптической скамьи обе линзы, образующие зрительную трубу, и снова находят расстояние между крайними штрихами в изображении, наблюдаемом через вспомогательную зрительную трубу, $l_1 = k \operatorname{tg} \varphi_1$. Увеличение зрительной трубы

$$g = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Полученные значения увеличения сравнивают между собой.

4.3.2.3. Моделирование зрительной трубы Галилея и определение ее увеличения.

Из имеющихся линз собирают модель зрительной трубы Галилея с заданным (преподавателем) увеличением. Сборка и проверка модели производится так же, как и для зрительной трубы Кеплера. (Замечание: при установке окуляра следует учесть, что фокусное расстояние его отрицательно).

Так как в окуляре зрительной трубы Галилея возникает мнимое изображение объекта, то увеличение можно определить только через углы зрения φ_1 и φ_2 .

4.3.2.4. Моделирование микроскопа и определение его увеличения.

Из имеющихся линз собирают модель микроскопа с заданным (преподавателем) увеличением. Для этого выбирают две собирающие линзы с подходящим фокусным расстоянием и находят соответствующую длину тубуса Δ . Расстояние между объективом и окуляром находят по формуле (4.8).

Затем помещают объектив и окуляр на оптическую скамью так, чтобы расстояние между ними равнялось Δ . Перемещением объекта (осветителя) по оптической скамье добиваются такого его положения, при котором в окуляр микроскопа видно резкое изображение объекта.

Увеличение микроскопа определяют, сравнивая угол зре-

ния объекта через микроскоп с углом зрения, под которым виден объект невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения ($L = 25$ см). Для этого помещают рядом с оптической скамьей вертикальную линейку на расстоянии 25 см от окуляра. Наблюдая одним глазом изображение объекта в окуляре микроскопа, а другим вертикальную линейку, определяют, сколько делений линейки помещается между крайними штрихами изображения. Пусть это число будет N . Измерив расстояние между соответствующими штрихами объекта (пусть это будет n делений вертикальной линейки), определяют увеличение микроскопа $K = N/n$.

Увеличение микроскопа определяют по меньшей мере три раза, находят среднее его значение и сравнивают результат с заданным в начале работы значением увеличения.

4.4. Вопросы

1. Объясните разницу между ходом лучей и построением изображения.
2. Найдите связь между угловым и линейным увеличением.
3. Покажите, что и в случае зрительной трубы Галилея верна формула (4.4).
4. Выведите формулу (4.5).
5. Каким путем можно повысить точность определения увеличения микроскопа?
6. Покажите, что при наблюдении в зрительную трубу наименьшее расстояние d , на которое можно сфокусировать глаз, определяется формулой $d = \mu^2 d_0$, где μ - увеличение трубы, а d_0 - минимальное расстояние отчетливого зрения объекта.

4.5. Литература

1. Наав А. Оптика. - Тарту: TRÜ, 1973. - I. - С. 15-106.
2. Ландсберг Т.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - Гл. XIV.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1971. - III. - Гл. II.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ, ПОЛЯ ЗРЕНИЯ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

5.1. Задание

Ознакомление с устройством зрительной трубы. Определение увеличения, поля зрения и разрешающей способности зрительной трубы.

5.2. Принадлежности

Зрительная труба на штативе, измерительная шкала, тест-таблица, коллиматор с источником света, измерительная лента, штангенциркуль.

5.3. Ход работы

Для успешного выполнения работы необходимо предварительно усвоить основные понятия геометрической оптики, знать ход лучей в зрительной трубе и свойства основных элементов оптической системы (см. литер. [1], [2]). Желательно также ознакомление с руководством предыдущей работы в данном сборнике.

5.3.1. Теоретические основы

5.3.1.1. Зрительная труба Кеплера.

Зрительная труба представляет собой оптическую систему, состоящую из объектива и окуляра, и предназначенную для наблюдения далеких предметов. Лучи света, идущие от далеких объектов, можно считать параллельными. Поскольку человеческий глаз в ненапряженном состоянии сфокусирован на бесконечность, а наблюдение в зрительную трубу происходит с помощью глаза, то зрительная труба устроена так, что из окуляра трубы выходит пучок параллельных лучей. Отсюда ясно, что зрительная труба в целом не имеет фокусов, т.е. параллельные лучи после прохождения через трубу остаются параллельными.

Оптические системы, не имеющие фокусов, называют афокальными.

Рассмотрим зрительную трубу Кеплера, которая в простейшем виде состоит из двух положительных линз (рис. 5.1). Длиннофокусный объектив дает в своей задней фокальной плоскости действительное перевернутое изображение. Короткофокусный окуляр служит для наблюдения изображения, даваемого объективом. С помощью окуляра глаз видит это изображение увеличенным и прямым (относительно самого объекта перевернутым). В фокальную плоскость объектива, где находится действительное изображение объекта, можно поместить шкалу.

Во избежание всевозможных aberrаций в зрительных трубах в качестве объектива и окуляра используются не простые линзы, а сложные комбинации линз. Чтобы иметь возможность наблюдать объекты в их прямом положении, в зрительной трубе Кеплера применяют дополнительные оптические системы, переворачивающие изображение, например, дополнительная положительная линза или различные комбинации призм.

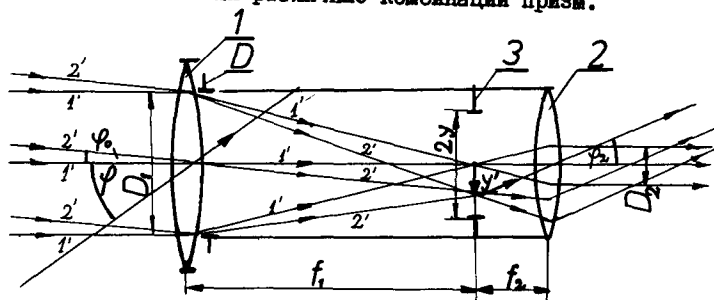


рис. 5.1. Зрительная труба Кеплера.

1 - объектив; 2 - окуляр; 3 - диафрагма поля зрения.

5.3.1.2. Диафрагмы в зрительной трубе.

Как в любой оптической системе, пучок лучей в зрительной трубе ограничен по причине конечных размеров линз. Помимо этого в зрительной трубе могут быть дополнительные отверстия, ограничивающие пучок лучей. Пучки лучей могут быть ограничены и за счет изображений всех этих отверстий. Действительные отверстия и их изображения находятся в соприкасающихся плоскостях и для них справедливы уравнения, при-

менимые к сопряженным плоскостям линз, с помощью которых можно вычислить положение и величину каждой диафрагмы. Точнее о положении и размерах диафрагм см. литер. [1], с. 89 - 96 и [2], с. 318-324.

Рассмотрим случай, когда в зрительную трубу попадает параллельный пучок лучей. Обычно первой преградой на пути этого пучка является оправа объектива. В зрительную трубу попадают только те лучи, которые прошли через объектив. Если пучок лучей не встречает на своем дальнейшем пути новых диафрагм, еще больше ограничивающих его, то объектив оказывается тем отверстием, которое определяет световой поток, прошедший через зрительную трубу.

Отверстие диафрагмы или его изображение, которое в самой большой степени ограничивает входящий в зрительную трубу пучок лучей, называют входным зрачком.

Действительную диафрагму, изображение которой определяет входное отверстие, называют апертурной диафрагмой. Во многих телескопических системах, как и в ранее рассмотренном случае, апертурной диафрагмой является оправа объектива. Если поместить позади объектива дополнительную диафрагму, то световой поток, прошедший через зрительную трубу, зависит не только от размеров диафрагмы, но и от положения ее на оптической оси. Так, например, в случае, изображенном на рис. 5.2, диафрагма DD , помещенная непосредственно за объективом, задерживает большую часть света, прошедшего через объектив, а диафрагма DD , помещенная вблизи фокальной плоскости объектива, пропускает весь световой поток, прошедший через объектив.

Изображение входного отверстия, даваемое всей оптической системой зрительной трубы, называют выходным зрачком. Обычно выходной зрачок выбирают равным главному зрачку. Если диаметр главного зрачка меньше диаметра выходного зрачка зрительной трубы (например, при сильной освещенности, когда зрачок рефлекторно суживается), то выходящий из зрительной трубы пучок лучей ограничивается более всего главным зрачком. В таком случае входным зрачком зрительной трубы оказывается изображение главного зрачка в зрительной трубе.

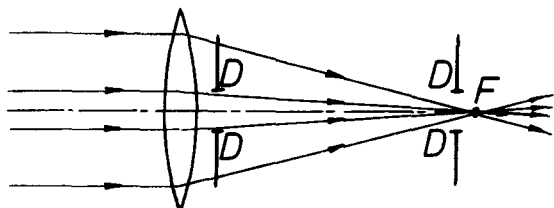


Рис. 5.2.

Апертурная диафрагма вместе с входным и выходным зречками определяет сечение пучка лучей, прошедших через зрительную трубу. Однако, не всякий параллельный пучок лучей, идущих от далеко расположенного предмета и вошедший в зрительную трубу через ее входной зрачок, проходит через трубу в целом, следовательно, не всегда можно получить его изображение. Например, лучи типа $l'l'$ (рис. 5.1), вошедшие в трубу под углом φ к ее оси, изображения не дадут. Полем зрения называют ту часть пространства объектов, которую мы видим через зрительную трубу. Если между объективом и окуляром нет дополнительных препятствий, то и поле зрения не имеет резких границ. Яркость изображения уменьшается монотонно к краям поля зрения до нуля. Часть поля зрения значительно более темная, чем центральная область, не имеет практического значения и в зрительной трубе обычно устраняется с помощью так называемой диафрагмы поля зрения.

Отверстие, которое из центра входного зрачка видно под наименьшим углом, называют люком. Действительная диафрагма, изображение которой есть люк, и является диафрагмой поля зрения. Для резкого ограничения поля зрения необходимо, чтобы люк совпал с плоскостью объекта. Следовательно, диафрагма поля зрения должна находиться в фокальной плоскости объектива зрительной трубы, поскольку сопряженная с ней плоскость лежит в бесконечности. Поле зрения определяется диаметром $2y$ этой диафрагмы и фокусным расстоянием f_1 объектива. Угол поля зрения σ относительно оптической оси находится из соотношения

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{y}{f_1}, \quad (5.1)$$

где 2σ - полный угол поля зрения.

Величина поля зрения может быть задана как через угловые, так и через линейные размеры в расчете на некоторое определенное расстояние (обычно 1000 м).

5.3.1.3. Увеличение зрительной трубы.

Угол, под которым мы видим объект при наблюдении его с определенного расстояния, тем больше, чем больше линейные размеры объекта (рис. 5.3). Зависимость между линейными размерами и углом зрения нелинейна:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (5.2)$$

Поскольку соотношение (5.2) справедливо и для любой телескопической системы, то угловым увеличением зрительной трубы можно считать отношение

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}, \quad (5.3)$$

где γ - угловое увеличение зрительной трубы; φ_2 - угол, под которым виден предмет в зрительную трубу; φ_1 - угол, под которым видит предмет невооруженный глаз.

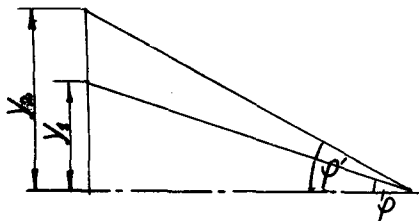


Рис. 5.3.

Пусть оптическая ось зрительной трубы направлена в один конец рассматриваемого далекого предмета. Лучи, идущие от другого конца предмета образуют с оптической осью угол φ_0 (рис. 5.1). В фокальной

плоскости объектива возникает изображение рассматриваемого предмета y' , которое одновременно находится и в фокальной плоскости окуляра. Рассмотрим луч, исходящий из верши-

ны изображения y' и попадающий в оптический центр окуляра. При прохождении через окуляр он направления не изменяет и образует с оптической осью угол φ_2 . Остальные лучи после прохождения через окуляр распространяются параллельно рассмотренному. Поскольку расстояние до объекта очень велико по сравнению с длиной зрительной трубы, то можно считать, что углы, под которыми лучи от вершины объекта падают в объектив зрительной трубы и в глаз, одинаковы, $\varphi_0 = \varphi_1$. Из рисунка 5.1 видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{y'}{f_1}, \quad (5.4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{y'}{f_2} \quad (5.5)$$

и

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (5.6)$$

где D_1 и D_2 суть диаметры входного и выходного зрачка соответственно.

Угловое увеличение определяется теперь как

$$\mu = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (5.7)$$

или, с учетом (5.6)

$$\mu = \frac{D_1}{D_2}. \quad (5.8)$$

Можно показать, что линейное и угловое увеличения зрительной трубы удовлетворяют соотношению

$$\mu \beta = 1, \quad (5.9)$$

где β — линейное увеличение системы.

5.3.1.4. Разрешающая способность зрительной трубы.

Разрешающая способность оптических систем, дающих изображение объекта, характеризует их способность давать два отдельных изображения двух близлежащих точек объекта.

Пусть лучи исходят из бесконечно далекого точечного источника. Если предположить, что объектив зрительной трубы свободен от аберраций, то в своем фокусе он должен дать изображение в виде точки. В силу дифракции на отверстии объектива в фокальной плоскости его возникает дифракционная картина – светлый центральный максимум и окружающие его темные и светлые кольца. Если лучи исходят из двух бесконечно далеких точечных источников, то, согласно условию Рэлея, границей их разрешимости считается такое их положение, когда центральный максимум дифракционной картины от одного источника совпадает с первым минимумом картины от второго источника (рис. 5.4). В таком случае интенсивность посередине между центрами двух максимумов составляет примерно 75 % от интенсивности максимумов. Такую разницу интенсивностей нормальный глаз уже способен заметить.

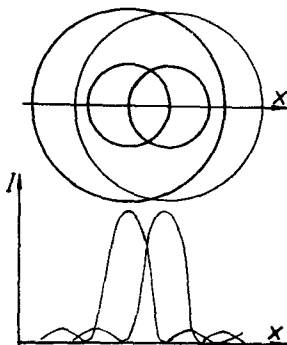


Рис. 5.4. Дифракционная картина в фокальной плоскости объектива в случае двух точечных источников света.

Наименьшее расстояние между еще различимыми точками изображения, следовательно, равно радиусу первого темного дифракционного кольца r_1 , который в фокальной плоскости объектива определяется формулой

$$r_1 = 1,22 \lambda \frac{f_1}{D_1} \quad (5.10)$$

где D_1 – диаметр входного зрачка, λ – длина световой волны.

Предельное угловое расстояние между еще разрешаемыми объективом точками

$$\varphi = \frac{z_1}{f_1} = 1,22 \frac{\lambda}{D_1} \text{ (рад)}. \quad (5.11)$$

Обратное значение этого предельного угла называют разрешающей способностью объектива A :

$$A = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,22} \frac{D_1}{\lambda}. \quad (5.12)$$

Окуляр на разрешающую способность зрительной трубы никакого влияния не оказывает. (Почему?)

5.3.1.5. Зрительная труба Галилея.

Кроме зрительной трубы Кеплера на практике использует еще зрительная труба Галилея, оптическая схема которой изображена на рис. 5.5. Объективом в этой трубе служит поперемному длиннофокусная положительная линза, окуляром же является отрицательная линза. Задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. В зрительную трубу Галилея наблюдается прямое изображение объекта. Все сказанное ранее применимо и к зрительной трубе Галилея.

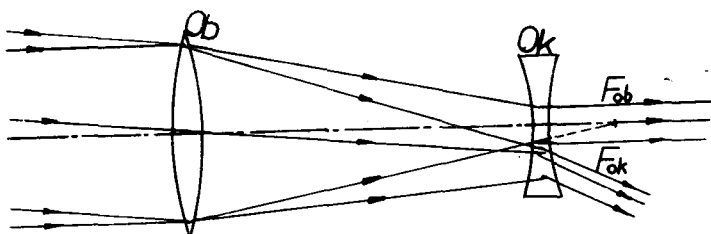


Рис. 5.5. Зрительная труба Галилея.

Подробнее о зрительной трубе Галилея см. литер. [I], с. 106.

5.3.2. Эксперимент

Для определения увеличения направляют зрительную трубу на шкалу, укрепленную на стене, и фокусируют ее до получения резкого изображения шкалы. Далее смотрят одним глазом изображение шкалы в зрительной трубе, а другим гла-

зом наблюдают шкалу мимо трубы так, чтобы сама шкала и ее изображение оказались рядом (рис. 5.6). Затем определяют, сколько делений шкалы, видимой невооруженным глазом, приходится на одно или несколько делений изображения шкалы в зрительной трубе. Проще всего найти число делений изображения, приходящихся на полную шкалу, видимую невооруженным глазом. Число непосредственно наблюдаемых делений шкалы, соответствующих одному делению изображения, видимого через зрительную трубу, и есть увеличение трубы, поскольку в случае малых углов можно тангенсы заменить длинами дуг соответствующих углов (см. формулу (5.3)).

Второй метод определения увеличения зрительной трубы заключается в следующем. Зрительную трубу фокусируют на бесконечность; после этого направляют ее на ярко и равномерно освещенный объект, причем надо следить за тем, чтобы объектив был целиком заполнен светом. Позади окуляра зрительной трубы помещают лист бумаги, на котором будет видно светлое пятно. Перемещая этот лист, получают на нем резкое изображение выходного зрчка, диаметр которого измеряют штангенциркулем. Измерив также диаметр объектива, являющегося входным зрчком, вычисляют по формуле (5.8) увеличение зрительной трубы.

Для определения поля зрения находят максимальную длину a участка шкалы, видимого в зрительную трубу, и измеряют расстояние b от объектива до шкалы. Отношение a/b и есть величина поля зрения в радианах. Умножив полученное отношение на 57,3, получают поле зрения в градусах.

Для определения разрешающей способности зрительной трубы фокусируют ее на тест-таблицу, представляющую собой набор квадратов, в каждом из которых штрихи имеют одинаковую ширину и находятся на равных расстояниях друг от друга (рис. 5.7). Ширина штрихов в миллиметрах указана на краях таблицы. Разрешающую способность определяют как отношение $A = \frac{1}{d}$. Предельный угол φ находят как отношение x/d , где φ - наименьшее различимое расстояние между штрихами, а d - расстояние от объектива зрительной трубы до таблицы. Измерения производят по меньшей мере два раза. Величину входного отверстия регулируют с помощью диафрагмы,

расположенной перед объективом. Диаметр диафрагмы в миллиметрах обозначен на ее оправе. По полученным данным чертят график зависимости $A = f(D)$, где D - диаметр входного зрелка. Полученные результаты сравнивают с вычисленными по формуле (5.12).

Для всех измерений производят оценку погрешности. Наименьшее различимое расстояние между штрихами λ не есть ширина штрихов, оно равно расстоянию между серединами соседних штрихов, т.е. двойной ширине штриха.

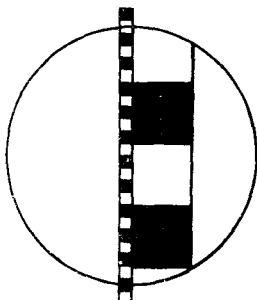


Рис. 5.6. Определение увеличения зрительной трубы.

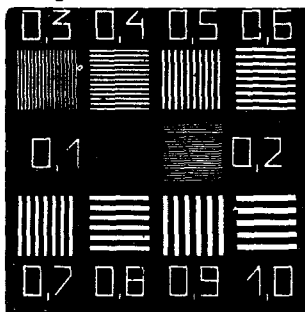


Рис. 5.7. Тест-таблица.

5.4. Вопросы

1. Сравните разрешающую способность глаза и зрительной трубы.
2. На сколько отличалась бы разрешающая способность зрительной трубы, если бы использовался белый свет?
3. Зависит ли разрешающая способность зрительной трубы от ее увеличения?
4. Как зависит поле зрения зрительной трубы от ее увеличения?
5. Можно ли в зрительной трубе Галилея пользоваться окулярной шкалой?
6. Покажите, почему поле зрения зрительной трубы по краям заметно темнее, чем в середине, если отсутствует диафрагма поля зрения.

7. Начертите схему какой-нибудь оптической системы, переворачивающей изображение. Чему равно ее увеличение?

5.5. Литература

1. Наав А. - Оптика. - Tartu: TRÜ, 1973. - I. - §§ I - 3I.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - С. 277-336.

6. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С МИКРОСКОПОМ

6.1. Введение и теоретический обзор

6.1.1. Оптические свойства глаза

Микроскопом пользуются при наблюдении маленьких лежащих объектов. Изображение объекта, даваемое микроскопом, рассматривают с помощью глаза, поэтому при конструировании микроскопов следует принимать в расчет свойства человеческого глаза как оптической системы. В последующем рассмотрим две физиологические особенности глаза, важные в данном случае.

Основной линзой глаза является хрусталик, дающий на сетчатой оболочке изображение y' объекта y (см. рис. 6.1).

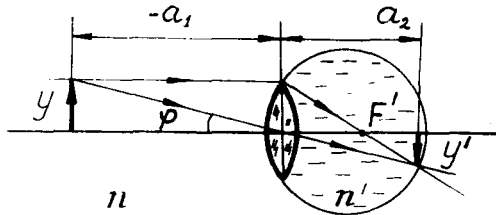


Рис. 6.1. Возникновение изображения в оптической системе глаза.

Позади хрусталика находится стекловидное тело, показатель преломления которого ($n' = 1,336$) отличается от показателя преломления воздуха ($n \cong 1$). Пользуясь для хрусталика формулой тонкой линзы, получим

$$\frac{n'}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f}. \quad (6.1)$$

где f - переднее фокусное расстояние хрусталика, a_1 - расстояние от предмета до глаза (до центра хрусталика), a_2 - расстояние от центра хрусталика до сетчатой оболочки. В случае глаза a_2 и n' суть постоянные величины. Чтобы получить на сетчатой оболочке одинаково отчетливые изображения предметов, находящихся на равных расстояниях l от глаза, надо в формуле (6.1) при изменении a_1 изменять и фокусное расстояние глаза f . Для этого имеются специальные мышцы, изменяющие кривизну (т.е. оптическую силу) хрусталика и позволяющие аккомодировать глаз в очень широких пределах. Оптическая сила глаза $\frac{1}{f}$ находится в пределах 60...70 диоптрий. При приближении предмета к глазу взрослого человека до расстояния 25 см аккомодация происходит без затруднений. Расстояние $l = 25$ см называют расстоянием наилучшего зрения. При рассматривании более близких предметов глаз приходится напрягать.

Рассмотрим другую особенность глаза. Свет, падающий на сетчатую оболочку, раздражает находящиеся там светочувствительные рецепторы. Это раздражение передается в головной мозг и создает там зрительное ощущение. Светочувствительные рецепторы находятся на некотором малом расстоянии друг от друга. Если изображение предмета настолько мало, что оно покрывает только один светочувствительный рецептор, то человек видит этот предмет в виде одной светящейся точки. Для того, чтобы изображение крайних точек предмета пришлось на светочувствительные рецепторы, расположенные рядом, надо, чтобы предмет был виден под углом зрения большим, чем φ_{min} (см. рис. 6.1). Угол φ_{min} равен приблизительно $1'$, а соответствующее ему расстояние между точками объекта равно 70 мкм, если предмет находится на расстоянии наилучшего зрения. Величина изображения при этом равна 5 мкм. Угол зрения определяется по формуле $\text{tg } \varphi = y/a_1$, т.е. зависит он как от величины предмета так и от расстояния, на котором он расположен.

Таким образом, можно сделать заключение: человек не может видеть детали очень далеких и очень маленьких предметов (видит их как точки).

6.1.2. Возникновение изображения в микроскопе

Оптическая схема микроскопа изображена на рисунке 6.2. Объективом микроскопа служит короткофокусная собирающая линза L_1 (для получения большого увеличения), окуляром — другая, тоже короткофокусная собирающая линза L_2 .

Предмет AB располагают перед объективом, на расстоянии немного большем фокусного. Объектив дает увеличенное, действительное изображение предмета $A'B'$.

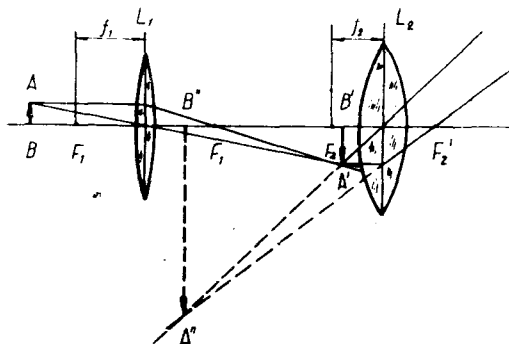


Рис. 6.2. Возникновение изображения в микроскопе.

Увеличение объектива

$$K_{об} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\Delta}{f_1},$$

где f_1 — расстояние до переднего фокуса объектива, a_1 — расстояние от предмета до объектива, a_2 — расстояние от объектива до изображения, практически равное расстоянию Δ от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра. (Фокусное расстояние объектива микроскопа обычно очень мало). Величину Δ называют оптической длиной микроскопа. Окуляр действует как лупа. Изображение $A'B'$, которое можно рассматривать как предмет по отношению к линзе L_2 , находится между линзой L_2 и ее передней фокальной плоскостью (практически в фокальной плоскости). Окуляр дает увеличенное, мнимое изображение $A''B''$ на расстоянии наилучшего зрения ℓ от глаза наблюдателя. Увеличение окуляра

$$K_{ок} = \frac{A''B''}{A'B'} = \frac{\Delta}{f_2},$$

где f_2 - расстояние до переднего фокуса окуляра. Суммарное увеличение микроскопа

$$K = K_{об} \cdot K_{ок} \quad (6.2)$$

или

$$K = \frac{A''B''}{AB} = \frac{\Delta \Delta}{L f_2}. \quad (6.3)$$

6.1.3. Разрешающая способность, числовая апертура и полезное увеличение микроскопа

Наименьшее расстояние между двумя точками, различимыми в микроскопе, называют пределом разрешения микроскопа. Так например, в биологическом микроскопе можно различить только такие структурные детали, размеры которых больше предела разрешения.

Разрешающей способностью микроскопа называют величину, обратную его пределу разрешения. Разрешающая способность микроскопа зависит от разрешающей способности его объектива. Окуляр не выявляет никаких дополнительных деталей структуры, он только увеличивает угол зрения.

Окончательная разрешающая способность оптического прибора обусловлена волновыми свойствами света. При наблюдении предметов, размеры которых одного порядка с длиной волны используемого света, получению резкого изображения препятствует отклонение света, от направления прямолинейного его распространения - дифракция света. Даже в случае идеальной оптической системы (в которой устранены все возможные аберрации) невозможно получение резкого изображения слишком маленьких объектов, так как возникает т.н. дифракционные кольца, перекрывающиеся между собой и не позволяющие различать отдельные детали объекта.

Согласно критерию Рэлея пределом разрешения считается такое расстояние между точками, при котором центр дифракционной картины от одной точки совпадает с первым темным кольцом в дифракционной картине от другой точки. Вычисле-

ния показывают, что расстояние между точками, еще различимыми в микроскопе

$$d = \frac{0,61 \lambda_0}{n \sin \vartheta}. \quad (6.4)$$

В этой формуле λ_0 - длина волны используемого света в вакууме. Величину $A = n \sin \vartheta$ называют числовой апертурой микроскопа, n - показатель преломления среды, заполняющей пространство между объективом и объектом, ϑ - угол между оптической осью и лучом, идущим из центра объекта к краю объектива (рис. 6.3), 2ϑ - угловая апертура микроскопа. При выводе формулы (6.4) предполагалось, что пучок света, попадающий в микроскоп, более всего ограничивается правой объектива.

При освещении препарата сходящимся пучком лучей с помощью конденсора разрешающая способность увеличивается до двух раз (т.е. можно различать в два раза меньшие детали); в этом случае

$$d_0 = \frac{0,61 \lambda_0}{2n \sin \vartheta}. \quad (6.5)$$

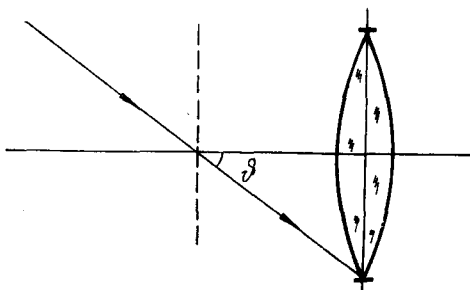


Рис. 6.3. К определению апертурного угла.

С целью увеличения разрешающей способности можно пользоваться светом с меньшей длиной волны, например, ультрафиолетовым. Оптические детали микроскопа в этом случае должны быть изготовлены из кварца, пропускающего ультрафиолетовые лучи. Изображение, полученное с помощью ультрафиолетового микроскопа, либо фотографируют либо рассматривают

действительное изображение, даваемое окуляром на флуоресцирующем экране, помещенном в плоскости изображения.

Другая возможность увеличения разрешающей способности микроскопа состоит в увеличении его числовой апертуры. Для этого используются иммерсионные объективы, при пользовании которыми пространство между покровным стеклом препарата и первой линзой объектива заполняется жидкостью с показателем преломления близким к показателю преломления стекла (глицерин, $n = 1,45$; монобромнафталин, $n = 1,65$; кедровое масло, $n = 1,52$; вода, $n = 1,33$ и др.). Ход лучей в случае сухого и иммерсионного объектива показан на рис. 6.4.

Если пространство между покровным стеклом и объективом заполняет воздух (рис. 6.4,а), то лучи, падающие на границу раздела покровного стекла и воздуха под углом, большим, чем предельный угол полного внутреннего отражения для этих сред, отражаются, возвращаются в покровное стекло и не попадают в объектив. Отражение происходит и с передней поверхности объектива, если угол падения лучей на эту поверхность достаточно велик.

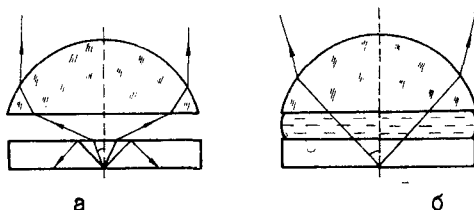


Рис. 6.4. Ход лучей в сухом и иммерсионном объективе.

При использовании иммерсионной жидкости (рис.6.4,б) свет от препарата к объективу распространяется в среде, оптически почти однородной, что дает возможность работать с большим конусом света. Разрешающая способность, а также яркость изображения увеличиваются при этом значительно.

Числовая апертура современных микроскопов с сухим объективом достигает 0,95. При применении иммерсионных объективов ($n = 1,5$) числовая апертура равна 1,4.

Для визуального наблюдения существенное значение имеет понятие полезного увеличения микроскопа. Из формулы увеличения микроскопа (6.3) видно, что при уменьшении f_1 и f_2 увеличение микроскопа возрастает. На практике увеличение редко превышает 1500–2000. В последующем выясним, почему это так.

Допустим, что размер предмета равен пределу разрешения d_0 . Если на расстоянии наилучшего зрения величина изображения равна d' , то увеличение

$$K = \frac{d'}{d_0}.$$

Из формулы (6.5) получится

$$K \approx \frac{Ad'}{\lambda_0}. \quad (6.6)$$

Как было указано ранее, нормальный глаз различает две точки с угловым расстоянием не менее $1'$. Чтобы было удобно работать с микроскопом, значение угла зрения изображения должно быть в пределах от $2'$ до $4'$. При рассматривании с расстояния наилучшего зрения это отвечает значению d' в пределах от 140 до 280 мкм. Подставив эти значения d' и длину волны $\lambda_0 = 0,555$ мкм в формулу (6.6), получим пределы значения увеличения

$$500 A < K < 1000 A,$$

с которыми удобно работать.

Увеличения, лежащие в указанных пределах, являются полезными в том смысле, что они позволяют с помощью глаза видеть все детали структуры, различаемые микроскопом как оптической системой. Подставив сюда значение числовой апертуры A , равное в современных микроскопах с иммерсионным объективом 1,4, получим для полезного увеличения следующее условие

$$700 < K < 1400.$$

Большие увеличения называют бесполезными. Бесполезные увеличения нецелесообразны, так как они приносят с собой увеличение аберраций и уменьшение освещенности поля зрения.

6.1.4. Описание микроскопа

В промышленности изготавливают в соответствии с требованиями практики разные микроскопы. В настоящем практикуме знакомятся с простым микроскопом, увеличение которого невелико, и с биологическим микроскопом "Биолам С11" (измерительный микроскоп с увеличением 1500).

Конструкция каждого микроскопа можно различить механическую и оптическую часть. Механическая часть микроскопа состоит из штатива, тубуса, предметного столика и держателя осветительной системы (рис. 6.5). Штатив опирается на основание 1, обеспечивающее устойчивость микроскопа. Стойка штатива 2 может быть либо закреплена неподвижно, либо ее можно наклонять для удобства работы с микроскопом.

В случае простого микроскопа в один конец тубуса 3 помещают окуляр 4, в другой ввинчивается объектив 5. У более сложных микроскопов на тубусе закреплен револьвер с объективами 6, содержащий 2-4 объектива и позволяющий быстро менять объективы. Чтобы оптическая ось каждого объектива при

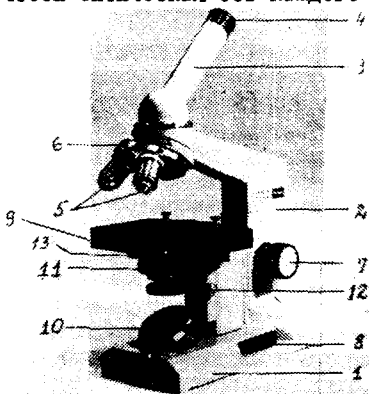


Рис. 6.5 Микроскоп "Биолам С11"

его установке точно совпадала с оптической осью микроскопа, револьвер снабжен специальным устройством, фиксирующим его в нужном положении. Тубус в целом соединен со стойкой с помощью кремальеры. Для перемещения тубуса имеются механизмы грубой и тонкой фокусировки (ручки 7 и 8). Препарат помещают на предметный столик 9, к которому он прижимается

двумя листовыми пружинами во избежание смещения его во время наблюдения.

Оптическая часть микроскопа начинается с зеркала IО (с одной стороны плоское, с другой вогнутое), с помощью которого свет направляется на препарат. В более сложных микроскопах имеется еще сложная система линз – конденсор II, назначение которого направить свет, идущий от зеркала, сильно собранным пучком на объект.

Конденсор (в микроскопе "Violam C11" используется конденсор КОН-3) перемещается вверх-вниз с помощью ручки I2.

Объектив – важнейшая деталь микроскопа – представляет собой систему линз в общей оправе. Передняя, т.н. фронтальная или главная линза определяет увеличение, задней других линз является уменьшение недостатков изображения. На объективе обозначены его числовая апертура и увеличение. Увеличения и числовые апертуры трех объективов микроскопа "Violam C11" следующие: 8х0,20; 40х0,65 и 90хI,25 (масляная иммерсия).

Окуляр состоит обычно из двух линз: верхней, обращенной к глазу, и нижней, которую называют коллективом. Линзы эти расположены друг от друга на расстоянии равном полусумме их фокусных расстояний. Обе линзы находятся в короткой цилиндрической трубке, которую вставляют в верхний конец тубуса микроскопа.

Конденсор КОН-3 биологического микроскопа снабжен радиальной диафрагмой I3 и отворачивающейся линзой, которой пользуются, работая с объективами, дающими малые увеличения ($3,5^X$ или 8^X). Имеющиеся в комплекте матовое стекло и светофильтр можно помещать в отворачивающуюся оправу. Конденсор перемещается в вертикальном направлении с помощью специального винта. Апертура конденсора максимальна в крайнем верхнем его положении.

6.2. Определение увеличения, числовой апертуры и разрешающей способности микроскопа

6.2.1. Задание

Определить увеличение, числовую апертуру, предел разрешения и разрешающую способность микроскопа.

6.2.2. Принадлежности

Микроскоп, вертикальная сравнительная шкала, полупрозрачное зеркало, шкала с делениями в 0,1 мм, непрозрачная пластинка с маленьким отверстием, кусочек пластмассовой шкалы с делениями в 1 мм, линейка.

6.2.3. Ход работы

6.2.3.1. Определение увеличения микроскопа.

Для определения увеличения пользуются простым методом, дающим хорошие результаты лишь при малых увеличениях. Поэтому в опыте используют микроскоп простой конструкции. В верхний конец тубуса вставляют окуляр, в нижний ввинчивают объектив. На предметный столик кладут объект — стеклянную пластинку с нанесенными на нее делениями в 0,1 мм. С помощью зеркала направляют свет на шкалу. Для освещения используют либо естественный свет либо специальный осветитель. Перемещением тубуса добиваются резкого изображения шкалы в микроскопе. Помещают рядом с микроскопом на расстоянии наилучшего зрения (25 см) вертикально сравнительную шкалу с миллиметровыми делениями. На окуляр помещают полупрозрачное зеркало под углом 45° к оси микроскопа. Зеркало это позволяет видеть одновременно шкалу, лежащую на предметном столике, и вертикальную сравнительную шкалу. Перемещением шкалы на предметном столике добиваются совпадения изображений обеих шкал. Обе шкалы должны быть освещены приблизительно одинаково. Этого можно достигнуть изменением наклона осветительного зеркала.

Отсчитывают число делений n_1 вертикальной шкалы, приходящихся на число n_2 делений шкалы, наблюдаемой в микроскоп. Так как деление сравнительной шкалы в 10 раз больше деления шкалы, наблюдаемой в микроскоп, то увеличе-

ние микроскопа

$$K = \frac{n_1}{n_2} \cdot 10.$$

6.2.3.2. Определение числовой апертуры и разрешающей способности микроскопа.

Для определения числовой апертуры используется тоже простой метод, применимый лишь для микроскопов с малым увеличением.

Прежде всего определяют угловую апертуру (см. рис.6.6). Для этого кладут на столик микроскопа пластинку с малым отверстием и фокусируют микроскоп на это отверстие (при необходимости перемещают пластинку, чтобы отверстие оказалось в середине поля зрения).

Затем поворачивают осветительное зеркало в горизонтальное положение и кладут на него пластмассовую шкалу с очень отчетливыми делениями (ценой в 1 мм). Шкалу освещают по возможности сильно. Осторожно, чтобы не нарушить резкость изображения, удаляют окуляр. Смотрят простым глазом в тубус и стараются увидеть резкое изображение шкалы, сосчитать число делений на всем видимом участке шкалы и определить полную длину a этого участка (см. рис. 6.6). С помощью линейки измеряют расстояние h от лежащей на зеркале шкалы до пластинки с отверстием, находящейся на предметном столике.

Затем находят $\operatorname{tg} \vartheta = \frac{0,5a}{h}$, ϑ и $\sin \vartheta$.

В случае сухого объектива $n = 1$ и числовая апертура микроскопа

$$A = \sin \vartheta.$$

Определяют предел разрешения d микроскопа. При освещении препарата сходящимся пучком света (с помощью конденсора) d_0 находят по формуле (6.5), при освещении параллельными лучами пользуются формулой (6.4) Длину волны принимают равной 0,55 мкм и вычисляют λ/d_0 .

Все результаты измерений и вычисления вносят в протокол.

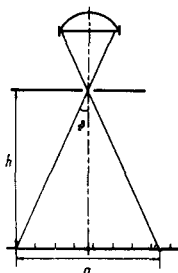


Рис. 6.6. Определение угловой апертуры.

6.3. Определение размеров объекта с помощью микроскопа

6.3.1. Задание

Градировка шкалы окулярного микрометра. Определение размеров исследуемого объекта.

6.3.2. Принадлежности

Микроскоп, окулярный микрометр, объективометр ОМП, исследуемый препарат.

6.3.3. Экспериментальная установка

Для определения линейных размеров объекта применяют микроскоп "Violam C11" с окулярным микрометром МОВ. Внутри окулярного микрометра (см. рис. 6.7) имеется шкала с делениями и стеклянная пластинка в оправе, которую можно перемещать с помощью микрометрического винта. На пластинку нанесен наклонный крест и двойной штрих, перпендикулярный к направлению перемещения пластинки. Поворотом барабана можно перемещать стеклянную пластинку относительно неподвижной шкалы. Одному полному обороту барабана отвечает перемещение двойного штриха на 1 мм. На барабане имеется 100 делений, так что поворотом на одно деление двойной штрих перемещается на 0,01 мм. Неподвижная шкала является вспомогательной шкалой, позволяющей отсчитывать число полных оборотов барабана. Оптическая система комплекта (микроскоп "Violam C11" с окулярным микрометром МОВ) построена так,

что изображение рассматриваемого объекта возникает в плоскости вспомогательной шкалы.

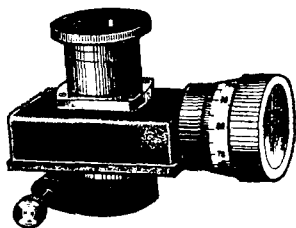


Рис. 6.7. Окулярный микрометр.

При измерениях в зависимости от объекта пользуются либо наклонным крестом, либо двойным штрихом.

Для измерения диаметра круглого объекта удобно устанавливать один из двух штрихов в положение касательной к очертанию объекта.

Если же границы объекта прямые, перпендикулярные к оси микрометра, то при измерениях удобно положение этих границ определять по середине расстояния между двумя штрихами, так как человеческий глаз оценивает более точно равенство расстояний некоторой прямой от двух соседних прямых, чем совпадение двух прямых.

Наклонным крестом пользуются для измерения отрезков прямых, наклонных к направлению двойного штриха.

Окулярный микрометр помещают в тубус микроскопа вместо окуляра и закрепляют винтом. При измерениях перемещают знак (двойной штрих или наклонный крест) на пластинке из одной крайней точки изображения объекта в другую, определяя таким образом размер изображения в делениях шкалы окулярного микрометра. Чтобы исключить ошибку, от мертвого хода (люфта) микрометрического винта, следует знак на пластинке подводить к обеим определяемым точкам изображения объекта, поворачивая барабан в направлении движения часовой стрелки.

Предположим, что измерение изображения дало расстояние между крайними его точками равным N' делений шкалы окулярного микрометра, т.е. N' делений шкалы на барабане.

Для определения соответствующего размера самого объекта поступают следующим образом. Вместо объекта кладут на

предметный столик объектмикрометр ОМП, представляющий собой шкалу из 100 делений, нанесенных на стеклянную пластинку, покрытую покровным стеклом. Пластинка эта наклеена на отверстие в стальной рамке. Цена деления шкалы ОМП равна 0,01 мм. Ширина штрихов шкалы равна $0,002 \pm 0,001$ мм. Делая отсчеты по этой шкале, следует ориентироваться либо на односторонние края штрихов либо на их середины. Допустимая погрешность одного деления равна 1 мкм, десяти делений – 2 мкм, полной шкалы (100 делений) – 3 мкм.

Теперь определяют цену деления объектмикрометра. Для этого считают число делений N окулярного микрометра, отвечающих отрезку шкалы объектмикрометра длиной ℓ . Цена деления шкалы окулярного микрометра $a = \frac{\ell}{N}$ (ℓ выражена в миллиметрах). Определенная таким образом цена деления шкалы окулярного микрометра справедлива только для того объектива, с которым были произведены измерения.

Линейный размер объекта вычисляют по формуле

$$x = aN'$$

или

$$x = \ell \frac{N'}{N}.$$

6.3.4. Ход работы

Перед тем, как приступить к измерениям, следует основательно ознакомиться со всеми деталями микроскопа, а также со всеми ручками управления. Оптические стеклянные поверхности не трогать!

1. С помощью винта грубой наводки 7 поднимают револьвер микроскопа в наиболее высокое положение, чтобы было удобнее ввернуть объектив. Используют объектив 8x0,20. Поворачивают револьвер до щелчка, что указывает на то, что ось объектива совпадает с оптической осью микроскопа. Закрепляют на тубусе микроскопа окулярный микрометр. В качестве измеряемого объекта используют например кусочек человеческого волоса. Его кладут на стеклянную подложку, накрывают покровным стеклом и помещают на предметный столик микроскопа.

Для освещения препарата пользуются либо естественным светом, либо осветителем, питаемым от сети с напряжением 220 В. Свет направляется в конденсор с помощью осветительного зеркала, пользуясь его плоской стороной.

2. Находят резкое изображение волоса в микроскопе. Для этого перемещают пластинку с волосом по предметному столику пока он не попадет в поле зрения. Затем приближают осторожно объектив к препарату на расстояние 1–2 мм с помощью винта грубой фокусировки. После этого с помощью винта тонкой фокусировки, медленно вращая этот винт, добиваются резкого изображения. Если одним полным оборотом не удастся получить резкого изображения, то следует переместить объектив немного вверх или вниз и снова с помощью винта тонкой фокусировки попытаться получить резкое изображение. Такой процесс повторяют до получения нужного результата. При этом следует помнить, что при повороте фокусировочных винтов по часовой стрелке тубус перемещается вниз, а вращением в обратном направлении – вверх.

При приближении объектива к препарату следует быть очень осторожным! Прикосновение в покровному стеклу испортит ценный объектив.

При полном обороте винта тонкой наводки тубус перемещается на 0,1 мм. Если волос не попадает в поле зрения микроскопа, фокусируют микроскоп на царапины или пылинки на поверхности покровного стекла. Затем перемещают препарат пока волос не окажется в поле зрения расположенным параллельно с двойным штрихом окулярного микрометра. Теперь закрепляют препарат с помощью пружин, уточняют резкость изображения и поворотом зеркала выбирают подходящее освещение.

3. Определяют диаметр волоса в единицах шкалы винта окулярного микроскопа (N'). При измерении пользуются двойным штрихом или крестом согласно вышеприведенным указаниям.

4. Поднимают револьвер микроскопа и кладут на столик вместо препарата объектмикрометр ОМП. Соблюдая вышеуказанные меры предосторожности, находят изображение микрошкалы. Градуируют шкалу окулярного микрометра, взяв по возможности большой отрезок l .

5. Вычисляют диаметр волоса в миллиметрах.

6. Определяют погрешность измерений, учитывая, что погрешность числа делений N (или N') равна половине деления. Допустимая погрешность длины отрезка ℓ приведена выше.

6.4. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа

6.4.1. Задание

Определить показатель преломления прозрачной пластинки.

6.4.2. Принадлежности

Микрометр, микроскоп, прозрачные пластинки.

6.4.3. Ход работы

6.4.3.1. Теоретические основы.

Предметы, находящиеся в прозрачной среде, кажутся нам находящимися ближе их действительного расстояния. Так, например, рассматривая дно водоема, глубина его кажется меньше действительной. Причина этого явления – преломление света. Поскольку кажущееся изменение дальности предмета зависит от показателя преломления среды, то можно это явление использовать для определения показателя преломления. Рассмотрим слой прозрачной среды, ограниченный двумя параллельными плоскостями (рис. 6.8). Толщина слоя равна d . При рассмотрении такой пластинки перпендикулярно к ее плоскости ее нижняя поверхность NN кажется в положении N_1N_1 .

Докажем это построением изображения каждой точки плоскости NN .

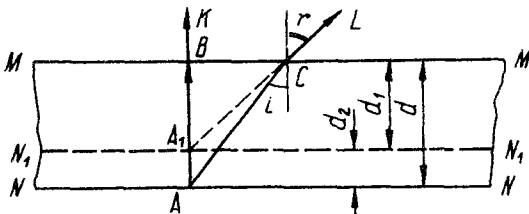


Рис. 6.8. Нахождение кажущегося положения нижней поверхности прозрачной пластинки.

Рассмотрим два произвольных луча, исходящих из некоторой точки A плоскости NN , попадающие в глаз наблюдателя. С целью упрощения рассуждений возьмем один из лучей (AB), перпендикулярный к плоскости пластинки. Другой луч ACL образует с первым небольшой угол. При большом угле между лучами они не попадут в глаз наблюдателя или объектив микроскопа.

На рис. 6.8 i и z суть угол падения и угол преломления луча ACL в точке C . Точка A_1 , в которой луч AB пересекается с продолжением преломленного луча CL , является мнимым изображением точки A . Совокупность точек, аналогичных точке A_1 , образует изображение N_1N_1 нижней плоскости NN . Из рисунка видно, что кажущаяся толщина пластинки $d_1 = A_1B$ меньше ее действительной толщины $d = AB$.

Найдем соотношение между величинами d , d_1 и показателем преломления вещества пластинки n .

Два прямоугольных треугольника ABC и A_1BC имеют общий катет BC , длину которого можно выразить двояко. С одной стороны

$$BC = A_1B \operatorname{tg} z = d_1 \operatorname{tg} z, \quad (6.7)$$

с другой

$$BC = AB \operatorname{tg} i = d \operatorname{tg} i. \quad (6.8)$$

Приравняв правые половины равенств (6.7) и (6.8), получим

$$d_1 \operatorname{tg} z = d \operatorname{tg} i,$$

откуда

$$\frac{d}{d_1} = \frac{\operatorname{tg} z}{\operatorname{tg} i}.$$

Вследствие малости углов z и i

$$\frac{d}{d_1} = \frac{\sin z}{\sin i}.$$

Согласно закону преломления света

$$\frac{\sin r}{\sin i} = n,$$

где n — показатель преломления вещества пластинки относительно воздуха.

Следовательно показатель преломления

$$n = \frac{d}{d_1}. \quad (6.9)$$

Таким образом, определив d и d_1 , можно найти показатель преломления вещества пластинки n .

6.4.3.2. Эксперимент.

В данной работе пользуются микроскопом, перемещение тубуса которого можно определять по прикрепленной к нему шкале.

Используемый микроскоп дает сравнительно небольшое увеличение, следовательно фокусное расстояние его объектива достаточно велико. Таким образом, под микроскопом можно поместить довольно толстую прозрачную пластинку, а углы падения и преломления света оказываются достаточно малыми.

Резкость изображения, видимого в микроскопе, зависит, кроме расстояния между предметом и объективом, еще от аккомодационной способности глаза. Поэтому при различном напряжении глаза можно видеть резкое изображение предмета, находящегося на разных расстояниях от объектива микроскопа. Чтобы избежать ошибок, связанных с аккомодацией, следует при измерениях напрягать глаз по возможности одинаково.

Неточности определения местоположения изображения уменьшаются при пользовании микроскопом с большим увеличением, когда т.н. глубина резкости относительно мала. Поскольку увеличение объектива должно быть мало, то для получения большего увеличения следует взять окуляр с возможным большим увеличением.

Случайных ошибок помогают избежать повторные измерения. Поэтому надо каждое измерение повторять не менее пяти раз и для вычисления показателя преломления взять средние многих измерений.

Измерения производятся тремя методами.

I. Первый метод. Исследуемую пластинку кладут на предметный столик и фокусируют микроскоп на ее верхнюю поверхность. Затем фокусируют микроскоп на нижнюю поверхность пластинки. Для этого надо микроскоп приблизить к пластинке на расстояние d_1 (см. рис. 6.8), меньшее, чем толщина пластинки d . Для определения расстояния d_1 регистрируют оба положения тубуса микроскопа, наведенного на верхнюю и нижнюю поверхности пластинки. Разность отсчетов по шкале тубуса дает значение d_1 . Толщину пластинки измеряют с помощью микрометра. Показатель преломления исследуемого вещества вычисляют по формуле (6.9).

II. Второй метод. Фокусируют микроскоп на верхнюю поверхность стеклянной пластины, лежащей на предметном столике. Затем кладут на эту пластину пластинку из исследуемого вещества. Теперь поверхность нижнего стекла перестает быть отчетливо видной. Чтобы снова иметь ее резкое изображение, надо тубус микроскопа поднять на расстояние d_2 (рис. 6.8). Из рисунка видно, что $d_2 = d - d_1$. Учитывая это, можно формулу (6.9) записать в виде

$$n = \frac{d}{d - d_2}. \quad (6.10)$$

По этой формуле и вычисляют показатель преломления при измерениях по второму методу.

III. Третий метод. Из соотношений (6.9) и (6.10) можно вывести еще третью формулу для вычисления показателя преломления, не содержащую толщины пластинки d . Для вывода надо выразить из соотношения (6.9) $d = nd_1$ и подставить в соотношение (6.10):

$$n = 1 + \frac{d_2}{d_1}.$$

Чтобы определить показатель преломления по этой формуле, надо измерить d_1 и d_2 вышеописанным образом.

Результаты, полученные измерениями по всем трем методам, оформляют в виде таблицы, где приводится и среднее значение показателя преломления исследованной пластинки.

6.4. Дополнительные вопросы

1. Постройте изображение предмета на сетчатой оболочке глаза для случая, когда предмет находится в фокальной плоскости линзы.
2. Как зависит фокусное расстояние тонкой линзы от радиусов кривизны ее поверхностей и показателей преломления сред?
3. Постройте ход лучей в микроскопе.
4. Как можно использовать микроскоп для фотографирования микрообъектов?
5. Докажите, что кажущаяся толщина прозрачной пластинки в n раз меньше истинной ее толщины, где n - показатель преломления вещества пластинки.
6. Показатель преломления зависит от длины световой волны. Для какой длины волны находят показатель преломления в данной работе?
7. Позволяет ли приведенная методика измерений определить зависимость показателя преломления от длины волны? Обоснуйте это оценкой погрешности измерений.

6.5. Литература

1. Наав А. - Optika, - Tartu: TRÜ, 1973. - I. - Лк. 15-21.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - С.346-366.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Оптика. - М.: Наука, 1980. - С. 357-380.

7. СРАВНЕНИЕ СИЛ СВЕТА ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА И ГРАДУИРОВКА ЛЮКСОМЕТРА

7.1. Задание

Ознакомление с фотометрическими единицами измерения и устройством фотометра. Сравнение силы света исследуемой лампы накаливания с силой света известного источника и определение электрической мощности, приходящейся на одну канделу. Градуировка фотометра и вычисление его чувствительности.

7.2. Принадлежности

Фотометр ФСМ, известный источник света, исследуемая лампа накаливания, амперметр, вольтметр, фотозлемент, микроамперметр, магазин сопротивлений.

7.3. Ход работы

Для успешного выполнения работы надо предварительно усвоить основные понятия фотометрии (поток излучения, световой поток, сила света, освещенность, светимость, яркость, световая экспозиция и т.д.), единицы измерения фотометрических величин и ознакомиться с устройством фотометров (см. литер. [1] и [2]).

7.3.1. Фотометрические величины и единицы их измерения.

Светом называют такое электромагнитное излучение, которое вызывает зрительное ощущение (промежуток длин волн 380 – 760 нм). Электромагнитное излучение можно измерять в единицах потока энергии (Вт, кал/с и т.д.). Зрительное ощущение – эффект физиологический и его сила зависит от длины световой волны, свойств глаза, адаптации глаза и т.д., поэтому нельзя оценивать величины, характеризующие свет, чисто физиологическими методами. В фотометрии и светотехнике

пользуются специальными единицами (кандела, люмен, люкс и др.), при определении которых учитывается субъективный характер светового восприятия, особенности измерительной аппаратуры (реагирующей непосредственно на ту или иную фотометрическую величину), а также наличие и восстанавливаемость эталонов.

Зависимость светового восприятия любого приемника света, в том числе и глаза, от длины световой волны характеризуется спектральной чувствительностью приемника. Для глаза мерой спектральной чувствительности $V(\lambda)$ является величина, обратная мощности монохроматического излучения разных длин волн, вызывающего одинаковое световое ощущение. Величину $K(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V(\lambda)_{\max}}$ называют относительной спектральной чувствительностью. Спектральная чувствительность глаза зависит от интенсивности света. При слабом освещении максимум чувствительности глаза смещается приблизительно на 50 нм в сторону коротких волн. При нормальном освещении глаз наиболее чувствителен к свету с длиной волны 556 нм. Мощности в 1 Вт такого излучения отвечает световой поток 683 люмена. Таким образом, максимальная чувствительность глаза равна 683 лм/Вт. Световой поток, отвечающий лучистому потоку со сложным спектральным составом, определяется интегралом

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) K(\lambda) d\lambda, \quad (7.1)$$

где $\varphi(\lambda)$ - мощность излучения, отвечающая единичному промежутку длин волн, $\varphi(\lambda)d\lambda$ - мощность излучения отвечающая промежутку длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, а $683 K(\lambda)$ - спектральная чувствительность глаза.

Светоотдачу источника определяет отношение

$$\eta_v = \frac{\Phi}{W} = \frac{683 \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) K(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda} \text{ (лм/Вт)}, \quad (7.2)$$

в котором числитель выражает полный световой поток в люменах, а знаменатель - полный поток энергии, излучаемый источником, в ваттах.

Под силой света источника (γ) понимается отношение

светового потока $d\Phi$, излучаемого точечным источником в телесный угол $d\omega$, к величине этого угла:

$$J = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (7.3)$$

При известной силе света J источника излучаемый им световой поток

$$\Phi = \int J d\omega \quad (7.4)$$

Если излучение распределено равномерно в пределах телесного угла ω , то световой поток, излучаемый в этот угол,

$$\Phi = J\omega \quad (7.5)$$

Источники, которые нельзя считать точечными, характеризуются яркостью. Яркость B источника определяется по формуле

$$B = \frac{dJ}{dS \cos \alpha} \quad (7.6)$$

где α - угол между нормалью к излучающей поверхности и направлением наблюдения, dJ - сила света, соответствующая элементу поверхности dS .

Освещенность E определяется, как отношение

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

где dS - элемент поверхности, а $d\Phi$ - поток света, падающего на этот элемент.

Кроме вышеприведенных, в фотометрии используется еще ряд величин, из которых назовем здесь световую энергию Q и световую экспозицию H . Эти величины определяются следующим образом:

$$Q = \int \Phi dt \quad (7.7)$$

$$H = \int E dt \quad (7.8)$$

По международному соглашению основной величиной в

фотометрии является сила света источника, единица которой— кандела—определена через излучение абсолютно черного тела. Абсолютно черное тело поглощает весь падающий на него поток излучения независимо от его спектрального состава или температуры самого тела. Кандела — сила света, испускаемого с площади $1/600000 \text{ м}^2$ поверхности абсолютно черного тела в перпендикулярном к этой поверхности направлении при температуре затвердевания платины (2046 К) и давлении 101325 Па.

Остальные фотометрические единицы выводятся из основной единицы кандела и приведены в следующей таблице.

Фотометрическая величина	Единица	Обозначение	Размерность
Сила света	кандела	кд	
Световой поток	люмен	лм	кд·ср
Световая энергия	люмен-секунда	лм·с	кд·ср·с
Яркость	нит	нт	кд/м ²
Освещенность	люкс	лк	кд·ср/м ²
Световая экспозиция	люкс-секунда	лк·с	кд·ср·с/м ²

7.3.2. Фотометр.

Силы света источников сравнивают с помощью фотометров. Фотометры подразделяются на визуальные и физические. В последних для регистрации света используются физические приемники света (фотоэлектронные умножители, фотоспротивления, фотоэлементы, специальные термоэлементы и столбики и т.д.).

В визуальных фотометрах регистрирующим свет прибором является глаз. Непосредственно глазом световые характеристики измерять нельзя, но глаз способен увидеть небольшие отличия в яркости отдельных частей поля зрения. Поэтому работа визуальных фотометров основана на уравнивании освещенностей двух частей поля зрения или получении равной контрастности между частями поля зрения. Фотометры первого типа называются фотометрами равного поля, ибо в них доби-

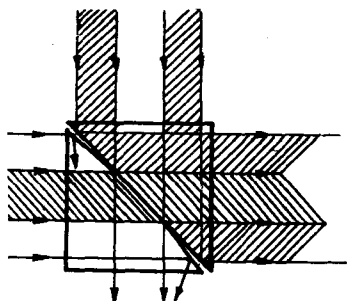


Рис. 7.1. Фотометрический куб.

ваются равной яркости двух сравниваемых полей зрения или исчезновения границы между ними. Такое положение называют фотометрическим равновесием. Деталь фотометра, где производится сравнение полей зрения, называется фотометрической головкой. Получение хорошего фотометрического поля обеспечивает фотометрический куб (фотометр Льюмера-Бродхуна, рис. 7.1). Его задача - привести два световых потока к двум прилежащим участкам поля зрения.

Фотометрический куб состоит из двух прямоугольных призм, у одной из которых грань, соответствующая гипотенузе, оставлена плоской только в середине, края же сошлифованы. Призмы тщательно приполированы и плотно прижаты друг к другу, причем средняя часть находится в оптическом контакте, края же полностью отражают свет.

Головка фотометра Льюмер-Бродхуна помещается между сравниваемыми источниками света (рис. 7.2). Свет, идущий от источников, проходит через отверстия a_1 и a_2 на белый экран (пластинка из мела или алебастрового гипса), с которого рассеивается во всех направлениях. Свет, поступающий справа, попадает на зеркало S_1 и, отразившись от него, частично проходит через фотометрический куб в области его оптического контакта, остальная же его часть отражается и попадает в окуляр. Свет, поступающий слева, также рассеивается с белого экрана. Часть его попадает на зеркало S_2 и оттуда на другую грань фотометрического куба. В месте опти-

ческого контакта призм он проходит через куб и попадает в окуляр. Остальной свет отражается и выходит из игры. В окуляр, наведенный на поверхность соприкосновения призм, видно поле зрения, определенное устройством куба. При измерении фотометр приводит в фотометрическое равновесие. В таком случае обе стороны фотометрического экрана освещены одинаково (одинаковы также их яркости). При освещении точечным источником света освещенность E выражается формулой

$$E = \frac{J \cos \alpha}{R^2}, \quad (7.9)$$

где R - расстояние от источника света до экрана, J - сила света источника, а α - угол падения лучей на экран (здесь 0). В условиях фотометрического равновесия

$$E_1 = E_2, \quad (7.10)$$

где E_1 и E_2 - освещенности двух сторон экрана. Следовательно

$$\frac{J_1}{R_1^2} = \frac{J_2}{R_2^2}. \quad (7.11)$$

Если известна сила света одного источника и измерены расстояния R_1 и R_2 от источников до экрана фотометра, можно из выражения (7.11) определить силу света другого источника.

В фотометре Льюмера-Бродхуна ход лучей, идущих с обеих сторон, симметричен, за исключением полного внутреннего отражения первого пучка в призме. С целью исправления ошибок, могущих возникнуть вследствие маленьких несимметричностей в фотометре (например, две стороны экрана рассеивают свет неодинаково и т.д.), делают всегда два измерения - одно в положении фотометра, показанном на рисунке 7.2, второе с фотометром, повернутым на 180° вокруг оси AA' , при котором пучки света меняются местами. Для вычисления силы света источника используют среднее полученных результатов (формула 7.15).

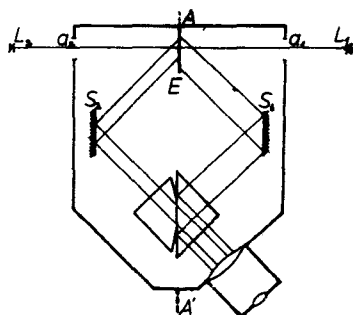


Рис. 7.2. Фотометр Ламмера-Броджуна.

Для получения одинаковой освещенности экрана фотометра с обеих сторон можно пользоваться несколькими методами, из которых простейшим является изменение расстояний между источниками света и экраном фотометра — используется соотношение (7.11). Поскольку отношение расстояний практически нельзя изменять в очень широких пределах, приходится пользоваться и другими методами ослабления светового потока: с помощью нейтрального поглощающего фильтра переменной толщины, поляроидов или вращающихся дисков с различными секторными вырезами (вращающийся поглотитель).

7.3.3. Описание фотометрической скамьи ФСМ.

Фотометрическая скамья состоит из следующих основных частей: оптической скамьи 1, передвижных рейтеров 2, головки фотометра 4, измерителя расстояния 5, вращающегося поглотителя 3 и держателей источника света 6 (рис. 7.3).

Передвижные рейтеры служат для укрепления устройств или деталей, помещаемых на оптическую скамью, и позволяют изменять расстояния между ними. В нижней части рейтера имеется штриховой индекс, по которому определяется положение рейтера относительно шкалы оптической скамьи. Фотометр помещают между сравниваемыми источниками света. Его опти-

ческая схема принципиально такая же, как приведенная на рисунке 7.2.

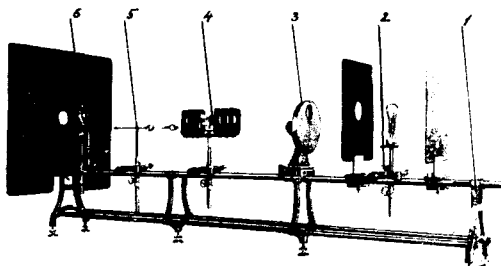


Рис. 7.3. Общий вид фотометрической скамьи ФМ.

Для фотометрических измерений следует все детали (источники света, приемный экран и т.д.) установить на оптической оси скамьи. Сперва устанавливают вращающийся поглотитель и фотометрическую головку, причем высота последней регулируется по положению отверстия поглотителя. Источники света помещают на концах оптической скамьи (почему именно там?). Затем удаляют приемный экран. Для этого надо нажать на щеку замка на раме экрана, вынуть экран и осторожно положить его на стол. Сквозное отверстие в корпусе головки закрывают с обеих сторон стеклами, на которые нанесены визирные кресты. Теперь можно зажечь лампы. Далее регулируют положение одной лампы таким образом, чтобы визирный крест, обращенный к этой лампе, спроецировался на другой. Затем производят такую же операцию с другой лампой. Держатели источников света позволяют перемещать лампы и перпендикулярно к оптической скамье и наклонять лампу в двух плоскостях. Держатели укреплены в рейтерах, в которых могут перемещаться вверх и вниз. Во время измерений стекла с визирными крестами удаляют и возвращают на свое место приемный экран. По обе стороны головки фотометра устанавливают черные бархатные экраны, чтобы исключить попадание в фотометр рассеянного света.

Точность измерения силы света источника сильно зависит от точности измерения расстояний, так как в вычислениях значения расстояний входят в квадрате и, следовательно, в выражения относительной погрешности освещенности будут входить удвоенные относительные погрешности расстояний.

На оптической скамье приходится измерять расстояния между разными деталями, например, между нитью накала лампы и приемным экраном. При измерениях же непосредственно можно регистрировать лишь положение рейтеров по шкале оптической скамьи. В общем случае перпендикулярная оптической скамье плоскость, в которой находится деталь (например, нить накала лампы), не совпадает с параллельной ей плоскостью, проходящей через индекс рейтера. Поэтому разность показаний индексов рейтеров не отображает величины расстояния между укрепленными в них деталями. Действительные расстояния между деталями можно определить с помощью специального дальномера. Дальномер представляет собой стержень, к одному из концов которого прикреплена симметричная относительно оси стержня металлическая дуга, на концах которой имеются визирные кресты. Стержень дальномера направляют по оси скамьи. Плоскость, проходящая через вертикальные штрихи визирных крестов дальномера, перпендикулярна к оси оптической скамьи. Расстояние (L_0) от этой плоскости до другого конца стержня указано в паспорте дальномера. Для измерения расстояний между объектами, укрепленными в рейтерах, устанавливают один из объектов (например, лампу накаливания) так, чтобы плоскость, от которой намереваются измерять расстояние (нить накала) совпала с плоскостью, проходящей через визирные кресты дальномера. С другой стороны подводят к концу стержня дальномера до соприкосновения с ним другой объект (приемный экран). В таком положении расстояние между объектами равно L_0 . Пусть отсчеты, снятые при этом со шкалы скамьи по индексам рейтеров будут n_1' и n_2' (рис. 7.4).

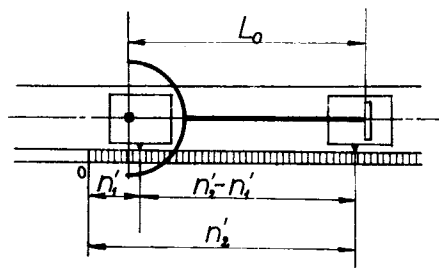


Рис. 7.4. Определение расстояния между деталями.

Допустим, что $n_2' > n_1'$. Действительное расстояние между объектами отличается от расстояния $n_2' - n_1'$ между индексами на положительную или отрицательную величину

$$\Delta = L_0 - (n_2' - n_1'). \quad (7.12)$$

При дальнейших измерениях можно перемещать оба рейтера вдоль скамьи и, если они окажутся в положении, при котором отсчеты индексов будут n_1 и n_2 , то в предположении, что $n_2 > n_1$ действительное расстояние между объектами

$$R = (n_2 - n_1) \pm \Delta. \quad (7.13)$$

Для определения силы света исследуемого источника надо установить состояние фотометрического равновесия, изменяя расстояния между источниками света и фотометрическим экраном. В случае, когда один из источников значительно сильнее другого, следует между ним и фотометром поместить вращающийся поглотитель. После включения мотора поглотителя надо при помощи реостата отрегулировать скорость вращения поглотителя таким образом, чтобы глаз не замечал миганий света, которые мешали бы определению фотометрического равновесия. Коэффициент пропускания поглотителя, приведенный в его паспорте, зависит от величины вырезанного сектора используемого диска.

Определение силы света происходит следующим образом (см. рис. 7.5). Сравнимые источники света, сила света которых равна J и J_0 , помещают на концах оптической скамьи по разные стороны от головки фотометра. Фотометрическое равновесие достигается перемещением головки фотометра относительно источников света. Определяют расстояния от одного и другого источника до приемного экрана (R и R_0). При этом выполняется соотношение

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R^2}{R_0^2} \quad (7.14)$$

Обычно применяется модифицированный вариант описанного метода. Поскольку стороны приемного экрана могут иметь не совсем одинаковые коэффициенты отражения, а также могут

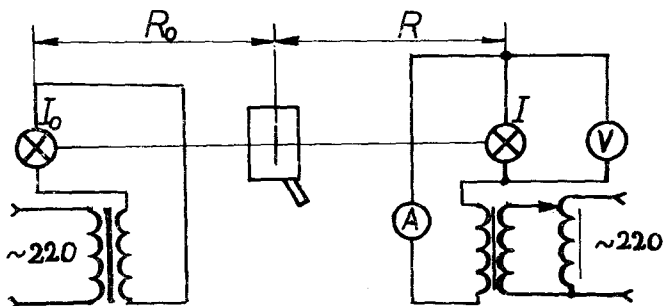


Рис. 7.5. Определение силы света источника.

отличаться потери света при прохождении через оптическую систему по разным путям, то следует повторять каждое измерение при повернутой на 180° головке фотометра. Фотометрическую головку можно поворачивать, убирая фиксатор на задней стороне головки.

Сила света высчитывается по формуле

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R' \cdot R''}{R'_0 \cdot R_0} \quad (7.15)$$

где R' и R'_0 суть расстояния между источниками света и приемным экраном фотометра при первом измерении, R'' и R_0'' - при повернутой на 180° головке фотометра.

Если при измерениях пользуются поглотителем, то формула (7.15) принимает следующий вид:

$$\frac{J}{K J_0} = \frac{R' \cdot R''}{R'_0 \cdot R_0''} \quad (7.16)$$

где K - коэффициент пропускания поглотителя, равный отношению светового потока, прошедшего через поглотитель, к потоку, падающему на него.

7.3.4. Фотоэлемент.

Ниже дается краткое качественное объяснение принципа действия фотоэлемента. Фотоэлемент является полупроводниковой системой, в которой p - n переход находится почти на

поверхности элемента. Электроны, генерируемые вследствие внутреннего фотоэффекта в поверхностном слое (Ca - полупроводник), проходят беспрепятственно запирающий слой в прямом направлении. Дырки, генерируемые в том же слое, не могут пройти через запирающий слой, ибо запирающий слой представляет для них потенциальный барьер. В случае замкнутой цепи генерируемые светом электроны проходят через внешнюю цепь и присоединенный к фотоэлементу микроамперметр показывает ток. Возникающее на концах внешней цепи напряжение действует и на фотоэлемент и уменьшает высоту потенциального барьера. Если сопротивление внешней цепи мало, то высота потенциального барьера остается практически неизменной и все генерируемые светом электроны проходят через внешнюю цепь. В таком случае сила фототока прямо пропорциональна освещенности в большом диапазоне значений освещенности. Если же сопротивление внешней цепи по порядку величины равно сопротивлению запирающего слоя в обратном направлении, то при увеличении освещенности потенциальный барьер существенно понижается. Вследствие этого часть электронов и дырок проходит запирающий слой в обратном направлении и проходящий через внешнюю цепь фототок зависит от освещенности нелинейно.

7.3.5. Эксперимент.

Вначале определяют зависимость силы света лампы накаливания от напряжения. Для изменения напряжения используется автотрансформатор. Потребляемая лампой мощность

$$N = i U, \quad (7.17)$$

где i - сила тока, проходящего через лампу, а U - напряжение на ее клеммах. Измерения производят при 7-8 разных значениях напряжения. Самое высокое напряжение, подаваемое на лампу, может превышать ее номинальное напряжение на 5%. Каждый раз измеряют напряжение U на лампе, силу тока i , проходящего через нее, а также расстояния от лампы накаливания и от известного источника света до головки фотометра в положении фотометрического равновесия. Фотометрическое равновесие определяется при одном напряжении 3-5 раз. Из полученных данных вычисляют силу света лампы накаливания и

мощность в ваттах, расходуемую на одну канделу при всех напряжениях. Результаты измерений представляют в виде таблицы:

$\Delta_1 = \dots\dots\dots$	$\Delta_2 = \dots\dots\dots$
Сила света известного источника	$\mathcal{J}_0 = \dots\dots\dots$
Коэффициент пропускания поглотителя	$\kappa = \dots\dots\dots$
Положение лампы накаливания	$\dots\dots\dots$
Положение известного источника	$\dots\dots\dots$

На основе полученных данных находят средние значения R' , R'' , R'_0 , R''_0 , вычисляют силу света лампы \mathcal{J} при разных значениях мощности. Результаты вычислений оформляют в виде таблицы.

По полученным результатам чертят графики зависимостей

$$\frac{N}{\mathcal{J}} = f(u) \text{ и } \frac{N}{\mathcal{J}_0} = f(v).$$

Теперь, когда известна сила света исследуемой лампы при различных напряжениях (в том числе и номинальном), можно приступить к градуировке люксметра. Градуируемый фотоэлемент находится на другой оптической скамье, на которой источником света является лампа накаливания, идентичная исследованной, с такой же силой света. Лампу питают номинальным напряжением, при котором сила света ее измерена. Напряжение проверяют с помощью вольтметра на цоколе лампы. Расстояние между лампой и фотоэлементом изменяют перемещением лампы на оптической скамье.

В протокол вносят отсчеты положения рейтеров лампы и фотоэлемента по шкале скамьи n_L и n_F . Для определения расстояния R между лампой и фотоэлементом пользуются дальномером. При изменении расстояния от лампы до фотоэлемента изменяется освещенность поверхности фотоэлемента, вычисляемая по формуле

$$E = \frac{\mathcal{J}}{R^2} \quad (7.18)$$

Для измерений собирают установку, схема которой приведена на рисунке 7.6. В начале измерений устанавливают на магазине сопротивлений небольшое сопротивление – примерно 100 Ом.

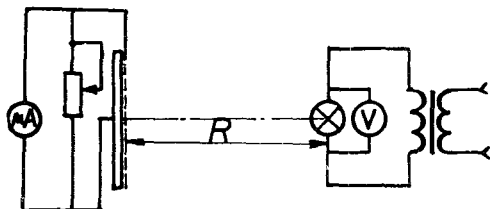


Рис. 7.6. Схема градуировки фотоэлемента.

Лампу придвигают к фотоэлементу так близко, как это позволяет установка и регулируют магазин сопротивлений так, чтобы отклонение стрелки микроамперметра было максимальным. В протокол вносят отвечающие этому положению значения n_F и n_L , а также значение силы фототока i . Удаляя лампу от фотоэлемента, регистрируют значения n_F и n_L , отвечающие значениям силы фототока с интервалами в 1 мкА. Измерения повторяют два раза. По полученным значениям n_F и n_L вычисляют расстояния R , а затем и освещенность E поверхности фотоэлемента. Результаты измерений оформляют в виде таблицы.

По полученным данным строят график зависимости фототока от освещенности. Чувствительность фотоэлемента определяют по прямолинейному участку графика.

Зная, что удельная мощность лампы накаливания зависит от напряжения, найти, какой режим питания лампы является наиболее экономичным. От чего зависит светоотдача лампы накаливания?

Показать, в каких условиях и почему градуировочный график фотоэлемента отклоняется от прямой (см. напр. [4]).

7.4. Вопросы

1. Что называют спектральной чувствительностью приемника света?
2. Что показывает светоотдача источника?
3. Почему светоотдача источника зависит от температуры?

4. Объясните, как работает вращающийся поглотитель? От чего и как зависит коэффициент пропускания поглотителя?
5. Объясните устройство и принцип действия фотометра Лиммера-Броджуна.
6. Какой источник света является точечным?
7. Зависит ли фотоэлектродвижущая сила от длины волны света?
8. Какой должна быть спектральная чувствительность фотозлемента, используемого в люксметре?
9. Зачем в люксметре нужна диафрагма?

7.5. Литература

1. Naav A. Optika. - Tartu: TRU, 1973. - I. - Lk. 107-127.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - С. 43-61.
3. Савельев И.Б. Курс общей физики. - М.: Наука, 1973. - III. - §§ 5-7.
4. Пикус Г.Е. Основы полупроводниковых приборов. - М.: Наука, 1965.

Оглавление

Введение	3
1. Остировка оптических измерительных приборов.....	4
2. Определение фокусного расстояния линзы и кардинальных элементов оптической системы.....	17
3. Определение радиуса кривизны и фокусного расстояния сферических зеркал.....	25
4. Моделирование оптических приборов и определение их увеличения.....	34
5. Определение увеличения, поля зрения и разрешающей способности зрительной трубы.....	42
6. Ознакомление с микроскопом.....	53
6.1. Введение и теоретический обзор.....	53
6.2. Определение увеличения, числовой апертуры и разрешающей способности микроскопа.....	62
6.3. Определение размеров объекта с помощью микроскопа.....	64
6.4. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа.....	68
7. Сравнение сил света источников с помощью фотометра и градуировка люксметра.....	73