НБ МИФИ
535
Ф50

ИСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
БРАЗОВАНИЯ РСФСР
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Руководство
к лабораторным занятиям по физике

Часть IV

МОСКВА 1962

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

535
Ф50

Кафедра ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Руководство к лабораторным занятиям по физике

Часть IV

под редакцией доц. И. Е. ИРОДОВА

БИБЛИОТЕЧНЫЙ ФОНД МИФИ

Москва 1962

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит описания лабораторных работ по оптике, выполняемых студентами Московского инженерно-физического института в четвертом семестре.

Содержащиеся в сборнике работы дают возможность студенту познакомиться в лаборатории со следующими разделами оптики: фотометрированием, лабораторным фотографированием, геометрической оптикой, интерференцией, дифракцией, поляризацией света и спектроскопией.

Практикум четвертого семестра создавался и совершенствовался коллективом кафедры общей физики МИФИ в течение ряда лет. Особо следует отметить роль в постановке многих работ и составлении первоначальных вариантов описаний к ним Ю. С. Лебедева и Е. П. Осмоловской.

В составлении описаний лабораторных работ данного сборника принимали участие Н. Н. Вердеревская (работа 24), И. А. Виноградов (работа 18), Н. И. Гольдфарб (работа 17), Н. С. Егорова (работы 19 и 21), О. И. Замша (работа 9), В. А. Кузнецова (работа 6), Ю. С. Лебедев (работа 1), Н. В. Масленникова (работа 3), Г. И. Пантюхов (работа 8), Ю. И. Плотников (работа 23), И. С. Ромченко (работа 4). Описания перечисленных работ составлены совместно с И. Е. Иродовым, которым подготовлены также описания и всех остальных работ.

И. Е. Иродов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

В лаборатории четвертого семестра студенту предстоит познакомиться со сложной оптической аппаратурой и приборами, действие которых в большей части основано на достаточно сложных и тонких явлениях. Это потребует от студента особенно тщательной предварительной подготовки к выполнению соответствующих работ. Поэтому, кроме описания работы, содержащего весьма краткие сведения, необходимо использовать следующие учебные пособия:

1. Ландсберг Г. С., Оптика.
2. Фриш С. Э. и Тиморева А. В., Курс общей физики, том III.
3. Горелик Г. С., Колебания и волны.
4. Физический практикум под ред. В. И. Ивероновой.
5. Яковлев К. П., Физический практикум, том II.

При выполнении работы студент ни коим образом не должен ограничиваться механическим повторением операций, указанных в задании к каждой работе. Необходимо отчетливо представлять себе в каждом случае, *почему* делается именно так, а не иначе, какова роль каждого элемента оптической системы. Рекомендуется в ходе выполнения работы попытаться подумать и над возможностью других вариантов решения задачи (или отдельных ее частей), обсудив с преподавателем их реальность. Только при таком критическом подходе к выполняемым работам можно эффективно развить в себе навыки к самостоятельным исследованиям, и практикум принесет нужные результаты.

При работе с оптическими приборами, находящимися в лаборатории, следует помнить о необходимости весьма осторожного обращения с ними. В частности, оптические поверхности нельзя протирать случайными материалами, нельзя также применять силу при установке или регулировке каких-либо частей приборов.

В процессе измерений следует систематически и аккуратно вести запись результатов измерений в лабораторный журнал. Помнить, что от этого во многом зависит успех всякой экспериментальной работы. Результаты измерений, как правило, долж-

ны заноситься в таблицы, формы которых нужно предварительно тщательно продумать. Все факторы, могущие оказать влияние на точность измерений, необходимо также записывать.

Настоятельно рекомендуется по крайней мере часть вычислений и графических построений проводить в процессе самой работы, ибо это дает возможность сразу же судить о ходе измерений, достоинствах и недостатках метода и состоянии установки.

Оформление работы заканчивается написанием краткого заключения, в котором должно быть указано:

1. Что и каким методом измерялось.
2. Полученный результат с указанием его погрешности.
3. Краткое обсуждение полученного результата и анализ погрешностей.

Работа 1

ИЗУЧЕНИЕ РАССЕЯННОГО ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что отражение света в той или иной степени происходит от поверхности любых тел, причем характер отраженного света зависит как от природы отражающих поверхностей, так и от угла падения.

Отражение света от идеально гладких поверхностей подчиняется законам зеркального отражения: угол падения равен углу отражения. Отражение же от реальных поверхностей благодаря наличию различного рода неровностей (следы обработки, царапины и т. п.) всегда сопровождается рассеянием света. Последнее выражается в том, что происходит частичное увеличение пространственного угла отраженного светового потока по сравнению с углом, в котором поток падает на поверхность. В отличие от зеркального отражения, такое отражение называется *рассеянным* или *диффузным.*

Хорошо рассеивающими поверхностями являются экраны для проекционных приборов, матовые и молочные стекла, поверхности мела, гипса и др.

Для характеристики рассеивающих поверхностей используются следующие фотометрические величины:

1. Освещенность, E — величина, численно равная потоку лучистой энергии $\Delta\Phi$, падающей на единицу поверхности $\Delta\sigma = 1$.

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma} \quad (эрг/сек \cdot см^2). \tag{1.1}$$

2. Яркость, B — величина, которая характеризует излучение светящейся (рассеивающей) поверхности по данному направлению, определяемому углом ϑ (рис. 1-1) с нормалью к поверхности, —

$$B_\vartheta = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega\Delta\sigma\cos\vartheta} \quad (эрг/сек\ см^2 рад), \tag{1.2}$$

где $\Delta\omega$ — элементарный телесный угол, в пределах которого заключен поток $\Delta\Phi$, отражаемый элементом поверхности $\Delta\sigma$.

Если яркость B не зависит от направления, определяемого углом ϑ, то говорят, что такая поверхность рассеивает свет по *закону Ламберта*. Поверхность, полностью рассеивающая весь

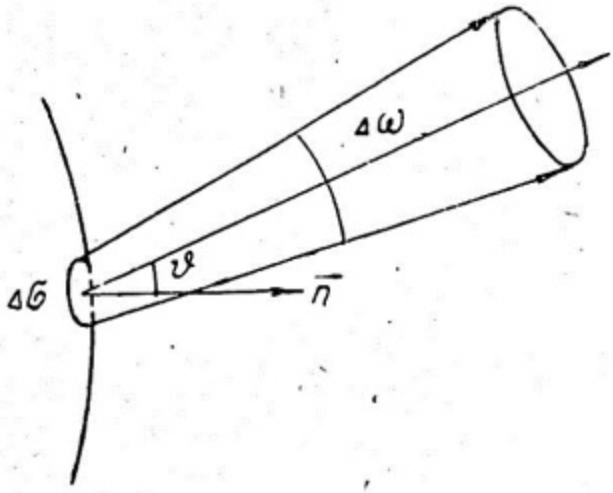

Рис. 1-1

падающий на нее световой поток и притом равномерно по всем направлениям (то есть согласно закону Ламберта), является *идеальным рассеивателем*. Хорошим приближением к идеальным рассеивателям являются мел, гипс.

3. Светимость, S — величина, численно равная суммарному потоку Φ, посылаемому единичной площадкой поверхности ($\Delta\sigma = 1$) наружу по всем направлениям, то есть внутрь телесного угла 2π:

$$S = \frac{\Phi}{\Delta\sigma} \ (эрг/сек\ см^2). \qquad (1.3)$$

Для поверхностей, подчиняющихся закону Ламберта, светимость S связана с яркостью B простым соотношением:

$$S = \pi B. \qquad (1\text{-}4)$$

4. Альбедо, r — коэффициент, характеризующий способность матовой поверхности отражать (рассеивать) падающий на нее поток лучистой энергии. Он равен отношению рассеянного светового потока к падающему на данную поверхность. Если освещенность рассеивающей поверхности E, а светимость ее S, то коэффициент отражения (альбедо)

$$r = \frac{S}{E}. \qquad (1{,}5)$$

В данной работе изучается характер рассеяния различных поверхностей и их отражательная способность.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Данная работа производится на установке, схема которой изображена на рис. 1-2.

На штативе *1* укреплен горизонтальный круг-лимб *2*, имеющий градусные деления. На общей поворотной оси, проходящей через центр лимба, укреплены жестко связанные друг

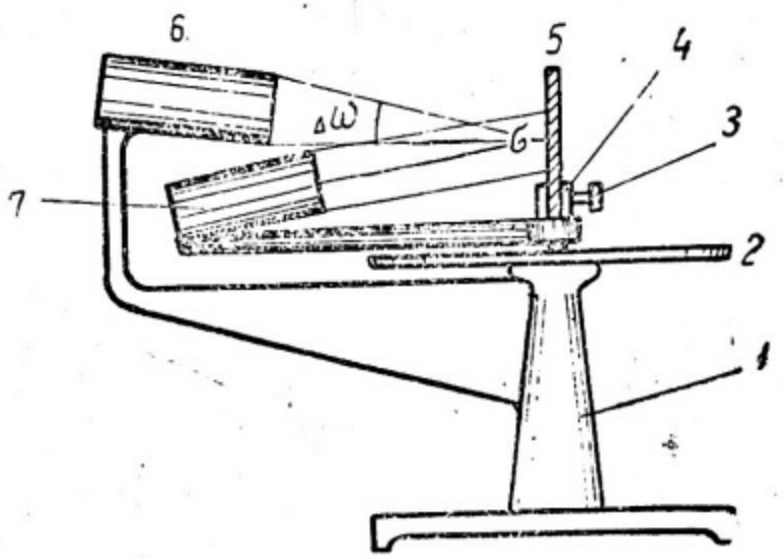

Рис. 1-2

с другом держатель *4* для исследуемых образцов и кронштейн с осветителем *7*. Осветитель дает пучок лучей, равномерно освещающих поверхность образца *5*. Накал лампы осветителя регулируется с помощью реостата, напряжение контролируется по вольтметру.

Пучок лучей для упрощения конструкции установки падает на исследуемую поверхность не перпендикулярно, а под некоторым углом. Соответственно этому расположен и фотоэлемент *6*. Он укреплен на отдельном кронштейне, жестко связанным с основанием *1* и соединен с чувствительным гальванометром.

Образцы с исследуемыми поверхностями закрепляются в держателе винтом *3*. Для предохранения от повреждения рамки с исследуемыми поверхностями снабжены защитными шторками.

Благодаря жесткой связи держателя образцов с осветителем обеспечивается всегда одинаковая ориентация исследуемых поверхностей относительно падающего светового пучка.

Фотоэлемент регистрирует световой поток, который рассеивается исследуемой поверхностью под углом θ, отсчитываемом в горизонтальной плоскости лимбом *2*. При изменении угла θ (путем одновременного поворота поверхности *5* и осветителя *7*

вокруг общей вертикальной оси) в фотоэлемент будут попадать соответственно различные световые потоки, рассеянные одной и той же площадкой σ при постоянном телесном угле Δω (рис. 1-2). Поэтому регистрируемый фотоэлементом световой поток согласно формуле (1-2) будет пропорционален величине $B_\vartheta \cos\vartheta$.

Таким образом, меняя угол ϑ, можно определить характер распределения рассеянного потока в различных направлениях.

Задание

Получение кривых рассеяния для различных поверхностей

Закрепив в держателе образец с меловой поверхностью и подняв защитную шторку, включить осветитель. Переключатель шкал гальванометра поставить на наименьшую чувствительность. Кронштейн с осветителем установить перпендикулярно поверхности, то есть на 0° по шкале лимба. В этом положении произвести регулировку накала лампы с таким расчетом, чтобы стрелка гальванометра не выходила за пределы шкалы. Зарегистрировать по вольтметру напряжение, и поддерживать его постоянным в процессе всех измерений.

Поворачивая кронштейн с осветителем через каждые 10°, сначала в одну сторону, затем в другую (от 0° до 90°), снять отсчеты показаний гальванометра. Если показания гальванометра малы, то следует переключить его шкалу на большую чувствительность, не допуская при этом зашкаливания стрелки. Измерения следует провести не менее трех раз.

Аналогичным способом произвести измерения для всех имеющихся образцов. Данные измерений записать в таблицу.

По результатам измерений построить на миллиметровой бумаге в полярных координатах кривые рассеяния. Длиной радиуса -вектора изображают величину светового потока $\Delta\Phi_\vartheta$ (в единицах фототока), а углом — направление, по которому измеряется световой поток. Концы радиусов -векторов соединить плавной кривой.

Кривые рассеяния для разных поверхностей изобразить на одном графике с общим началом координат и в одинаковом масштабе.

Из данных измерений для меловой поверхности вычислить среднее значение $\overline{A}$ отношения $A = \Delta\Phi_\vartheta/\cos\vartheta$ (в единицах фототока).

Принимая это значение $\overline{A}$ за постоянный коэффициент, построить для сравнения на том же графике и в том же масштабе кривую рассеяния, соответствующую закону Ламберта. Расчетная формула для этой кривой, очевидно, будет иметь вид

$$\Delta\Phi_\vartheta = \overline{A} \cdot \cos\vartheta.$$

Работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭМУЛЬСИИ

ВВЕДЕНИЕ

Нормальный светочувствительный материал (фотоэмульсия), используемый для целей фотографии, состоит из весьма большого числа мельчайших кристалликов (зерен) галоидного серебра (AgBr, AgCl и др.), взвешенных в слое желатины. Эта эмульсия наносится ровным слоем на подходящую подложку (стекло, пленка, бумага).

При облучении эмульсии фотографически активным светом галоидное серебро разлагается на металлическое серебро и галоид.

Обычно действие света не вызывает какого-либо видимого изменения эмульсии — экспонированная эмульсия содержит *скрытое изображение,* соответствующее оптическому. Скрытое изображение, однако, можно превратить в видимое изображение воздействием проявляющего вещества — проявителя.

Проявитель — это химический реагент, восстанавливающий галиодное серебро до металлического серебра. Серебро в процессе проявления выделяется в виде мельчайших кристалликов в тех зернах эмульсии, которые содержат частицы металлического серебра, образующих скрытое изображение, и увеличивает интенсивность этого изображения в миллионы раз.

После проявления невосстановленное галоидное серебро растворяется в фиксирующем растворе—фиксаже.

В результате получается негативное изображение: облученные участки эмульсии будут темными, необлученные — прозрачными.

Степень почернения фотоэмульсии, возникающего под действием света и последующей химической обработке, характеризуют *оптической плотностью почернения D.* Эта величина характеризует степень пропускания света фотографическим почернением и определяется как десятичный логарифм отношения интенсивности света J_0, падающего на почерневший уча-

сток фотоизображения, к интенсивности света J, прошедшему через него:

$$D = \lg \frac{I_0}{I}. \qquad (2.1)$$

Оптическая плотность почернения D зависит от *экспозиции* H, под которой понимают произведение освещенности светочувствительного слоя на время экспозиции (выдержку).

Зависимость оптической плотности почернения от логарифма экспозиции показана графически на рис. 2-1. Эта кривая носит название *характеристической кривой* фотоэмульсии.

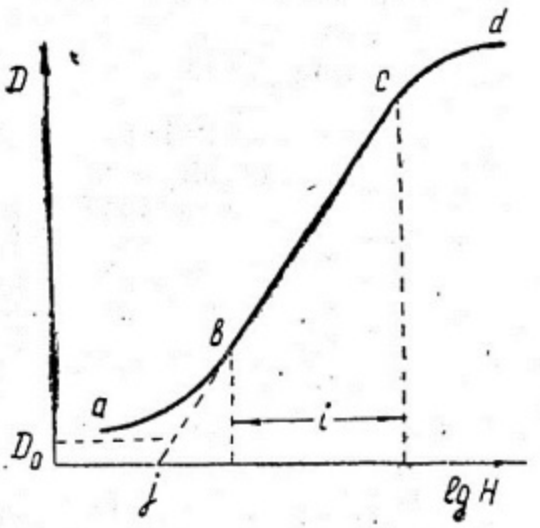

Рис. 2-1

Как видно из рис. 2-1, фотоэмульсия, даже не подвергнутая экспонированию, обладает после химической обработки некоторым почернением D_0 (*фотографическая вуаль*).

Прямолинейный участок кривой *bc* называется областью *нормальной экспозиции*. На этом участке почернение пропорционально логарифму экспозиции. Крутизна данного участка кривой, характеризуемая отношением

$$\gamma = \frac{\Delta D}{\Delta \lg H}, \qquad (2.2)$$

называется *коэффициентом контрастности* фотоэмульсии.

Протяженность прямолинейного участка, выраженная через логарифм отношения экспозиций конца и начала этого участка, характеризует фотографическую *широту эмульсии* i:

$$i = \lg \frac{H_c}{H_b}. \qquad (2.3)$$

Точка пересечения прямолинейного участка кривой с осью абсцисс носит название *точки инерции* фотоэмульсии *j*.

Участок *ab* кривой представляет собой область *недодержек* и характеризуется отставанием почернения от роста экспозиции. Область *cd* является областью *передержек*. В этой области при очень больших экспозициях рост почернения сначала замедляется, затем прекращается вовсе и, наконец, даже начинает уменьшаться. Последнее явление носит название *соляризации*.

Обе крайние области кривой характеризуются резким уменьшением контрастности. Недодержки отличаются от передержек, как видно из характеристической кривой, различным общим почернением или, как говорят, плотностью негатива. Недодержки имеют малую плотность почернения, передержки — большую.

Весьма существенной характеристикой фотоэмульсии является *светочувствительность s* — величина, обратная количеству света H_s, под действием которого возникает оптическая плотность почернения D, превышающая плотности вуали D_0 на 0,2 ($D = D_0 + 0{,}2$). Таким образом,

$$s = \frac{1}{H_s}. \qquad (2.4)$$

Чувствительность фотоэмульсии зависит от длины волны облучающего света. Обычные сорта фотоэмульсии (AgBr) практически полностью не чувствительны к красной области спектра, имеют максимум чувствительности для длины волны 0,25 *мк* и вновь становятся нечувствительными для длин волн менее 0,22 *мк* (последнее вызвано поглощением излучения в желатине фотоэмульсии). Фотоэмульсии становятся опять чувствительными к излучению в рентгеновской области. Для расширения области чувствительности в состав фотоэмульсий добавляют специальные вещества — *сенсибилизаторы*.

Большое влияние на вид характеристической кривой имеет характер проявителя, его состав, температура, свежесть, концентрация и продолжительность процесса проявления. На рис. 2-2 показано изменение вида характеристической кривой одной и той же фотоэмульсии в зависимости от времени проявления. Как видно из рисунка, увеличение времени проявления t вызывает рост коэффициента контрастности γ. Однако, рост коэффициента контрастности, вначале очень быстрый, по мере увеличения времени проявления замедляется и, наконец, начиная с некоторого момента, прекращается совсем. Увеличение времени проявления приводит к равномерному повышению плотности почернения — так называемой химической вуали.

В данной работе в качестве изучаемого фотографического материала используется несенсибилизированная позитивная кинопленка, обладающая малой широтой и высокой контрастностью. Эмульсия этой пленки чувствительна в основном

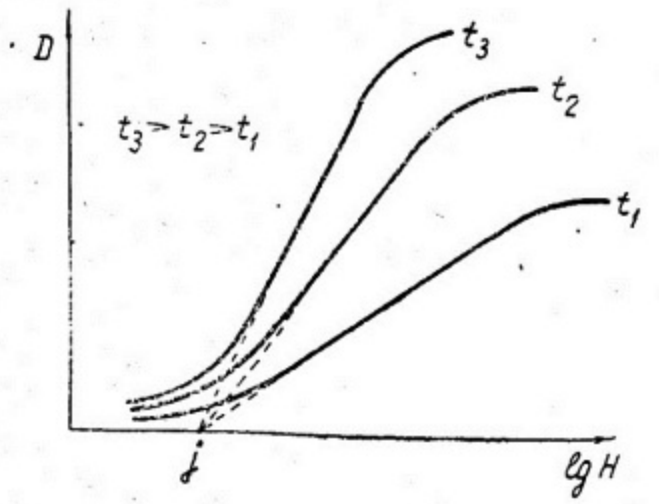

Рис. 2-2

только в сине-фиолетовой части спектра, что позволяет производить обработку ее при красном освещении.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка, используемая в данной работе, состоит из двух основных частей: осветительного устройства с оптическим клином (сенситометром), служащего для экспонирования фотопленки, и денситометра — прибора для измерения плотности почернения негатива, полученного после соответствующей фотохимической обработки экспонированной пленки.

Осветительное устройство состоит из прямоугольного ящика, в нижней части которого находится осветительная лампа, закрытая матовым стеклом. Сверху на ящик накладывается кассета с сенситометром и фотопленкой. Время экспозиции отсчитывается по секундомеру. Включение и выключение осветительной лампы и секундомера производится одновременно с помощью кнопки.

Сенситометр служит для получения шкалы освещенностей экспонируемой эмульсии. Он представляет собой стеклянную пластинку со ступенчатым оптическим клином, состоящим из 30 ступеней (полей), светопропускаемость которых скачкообразно уменьшается с ростом номера ступени n, причем так, что логарифм отношения интенсивности света I_0, падающего на

сенситометр, к интенсивности света I_n, прошедшего через n-ю ступень сенситометра, определяется соотношением

$$\lg \frac{I_0}{I_n} = 0{,}2 + 0{,}1\,n, \qquad (2.5)$$

где $n = 1{,}2, \ldots 30$.

Отсюда легко найти экспозицию H_n, которой подвергается участок фотопленки, расположенный за n-й ступенью сенситометра. Действительно, имея в виду, что экспозиция $H = I \cdot t$, перепишем формулу (2.5) в следующем виде

$$\lg \frac{H_0}{H_n} = 0{,}2 + 0{,}1\,n, \qquad (2.6)$$

где H_0 — экспозиция, которая имела бы место в отсутствии сенситометра, H_n — экспозиция n-го участка фотопленки. Если экспозицию H_n измерять в единицах H_0, то

$$\lg H_n = -(0{,}2 + 0{,}1\,n). \qquad (2.7)$$

После экспонирования фотопленки и последующей химической обработки на ней получается ступенчатая сенситограмма, пронумерованная от $n = 1$ до $n = 30$.

Измерение оптических плотностей почернения сенситограммы производится на денситометре (визуальном или фотоэлектрическом).

Визуальный денситометр ИФТ-11

Принципиальная схема прибора и его внешний вид представлены на рис. 2-3.

Источник света *С* (рис. 2-3,а) дает два пучка лучей. Один проходит через оптический измерительный круговой клин *И*, фотопленку *П* и отверстие в зеркале *3*, образуя в окуляре *Ок* центральное световое поле. Другой пучок лучей после отражения от зеркала *1* проходит через компенсационный оптический клин *К*, отражается от зеркал *2, 3* и образует в окуляре второе (внешнее) поле сравнения.

На корпусе прибора (рис. 2-3,б) расположены: кронштейн с окуляром *Ок*, головка кремальеры *К* для перемещения компенсационного клина, диск *И* для поворота измерительного клина, шкалу которого наблюдают через окошко *Ш*, и препаратоводитель *В* с рамкой для пленки.

Оптические плотности измерительного клина равномерно изменяются от 0 до 3,3. Цена деления его шкалы 0,02.

Работа на денситометре ИФТ-11 проводится в следующем порядке. Сначала денситометр подключают через трансформатор к сети и устанавливают шкалу измерительного клина *И* на нуль. Затем опускают рычаг с окуляром *Ок* на панель, включая тем самым осветитель, и, удерживая рычаг в этом положе-

нии левой рукой, вращением револьверного диска *Д*, вводят в поле зрения окуляра прямоугольное отверстие, докусируя его окуляром. После этого тщательно уравнивают освещенности обоих световых полей путем перемещения компенсационного клина кремальерой *К* (в дальнейшем положение компенсационного клина должно оставаться неизменным).

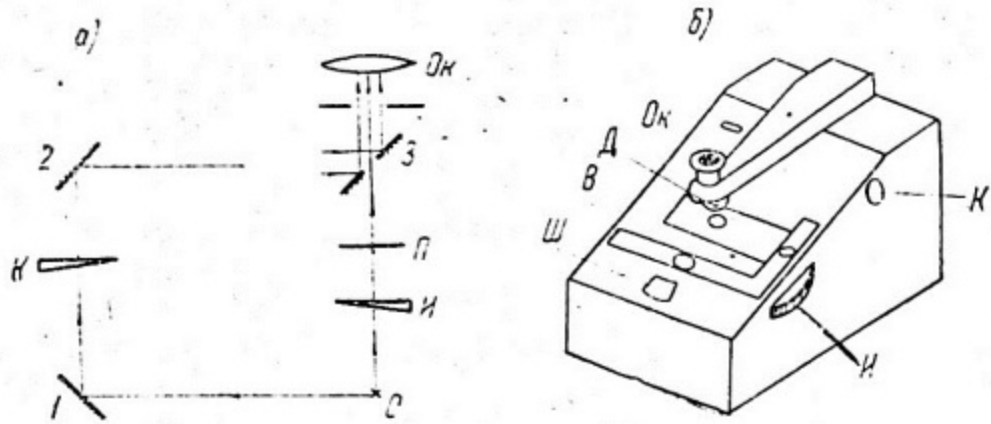

Рис. 2-3

Вставив затем пленку (эмульсией вниз) в рамку препаратоводителя, производят измерения плотностей почернения различных участков ее, уравнивая каждый раз освещенности обеих полей сравнения поворотом измерительного оптического клина *И* и снимая отсчеты по его шкале.

Фотоэлектрический денситометр ДФЭ-10

Принципиальная схема прибора и его внешний вид показаны на рис. 2-4. Источник света *С* (рис. 2-4,а) дает два световых пучка: один проходит через измерительный круговой оптический клин *И*, фотопленку *П* и падает на поверхность измерительного фотоэлемента $Ф_и$ второй пучок, пройдя через компенсационные клинья *К*, падает на поверхность компенсирующего фотоэлемента $Ф_к$. Фотоэлементы подключены к зеркальному гальванометру *Г* навстречу друг другу. При равенстве световых потоков разность фототоков равна нулю, что соответствует нулевому положению указателя гальванометра.

На корпусе прибора (рис. 2-4,б) расположены: препаратоводитель *В* с рамкой для пленки, перемещение которого осуществляется маховичками *М*; рычаг $Ф_и$ с измерительным фотоэлементом; два диска *К* для перемещения компенсационных клиньев (грубого и тонкого); диск *И* для вращения измерительного клина, шкалу которого наблюдают через окошко *Ш*; окошко *Г* с индикатором нуля гальванометра; рукоятка *Н* для точной корректировки нуля гальванометра при выключенных

фотоэлементах и тумблер *Т* (слева внизу, на рисунке не виден) для включения фотоэлементов.

Оптические плотности измерительного клина равномерно изменяются в пределах от 0 до 3. Цена деления шкалы 0,02.

Работа на денситометре ДФЭ-10 проводится в следующем порядке.

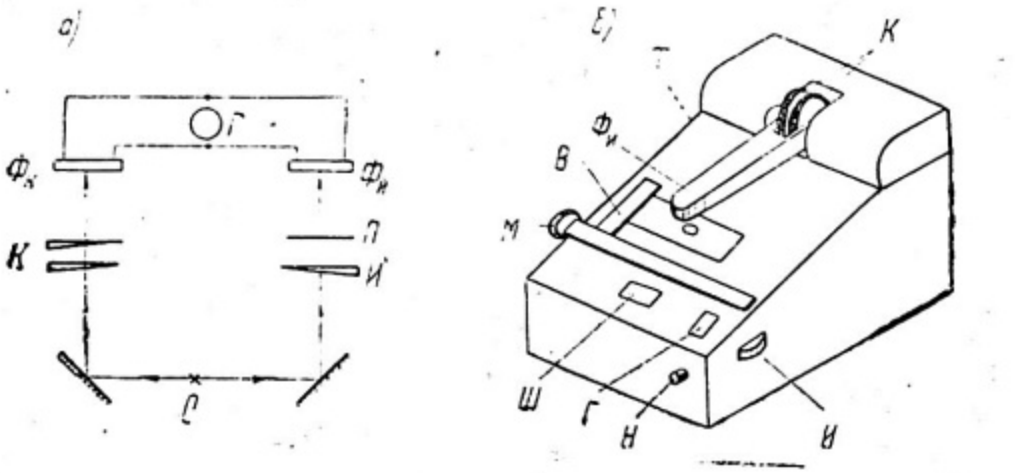

Рис. 2-4

Сначала прибор подключают через трансформатор к сети. Затем, выключив тумблером *Т* фотоэлементы, коректором *Н* совмещают индикатор нуля гальванометра с прерывистым индексом на матовом экране в окошке *Г* (установка нуля проводится в отсутствии фотопленки). Поворотом диска *И* устанавливают шкалу измерительного клина в окошке *Ш* на нуль, включают тумблером *Т* фотоэлементы и рычаг $Ф_и$ опускают на панель.

Поворотом дисков *К* индикатор нуля гальванометра опять совмещают с прерывистым индексом в окошке *Г*. На этом настройку прибора заканчивают.

После этого в рамку препаратоводителя *В* вставляют пленку (эмульсией кверху) и производят измерения плотностей почернения ее различных участков, совмещая каждый раз индикатор нуля гальванометра в окошке *Г* с прерывистым индексом (поворотом измерительного клина *И*) и снимая соответствующие отсчеты по шкале *Ш*.

Ввиду возможной нестабильности работы фотоэлементов после каждой серии измерений следует проверить нулевое положение прибора (в отсутствии пленки). Если отклонение от нулевого положения превышает ширину прерывистого индекса, то результаты измерений данной серии следует отбросить и повторить вновь.

Задание

1. Экспонирование и обработка сенситограммы

В фотоящике (или фотокабине) зарядить кассету фотопленкой эмульсией к сенситометру. Закрепить кассету на осветителе, выдвинуть шторку и, включив лампу и секундомер, экспонировать пленку в течение времени, указанного преподавателем.

Экспонированную пленку проявить согласно приложению в конце сборника. Результаты проявления показать преподавателю, после чего пленку положить в сушильный шкаф.

2. Измерение плотности почернения сенситограммы.

Включив денситометр в сеть и установив нуль шкалы измерительного клина, провести настройку прибора, как описано выше.

Затем в рамку препаратоводителя вставить полученную сенситограмму, подвести ее к измерительному отверстию необлученной частью и произвести измерение плотности почернения. После этого промерить плотности почернения D_n всех ступеней сенситограммы (начать с наиболее светлой), передвигая каждый раз пленку на 5 *мм* по шкале препаратоводителя. Плотность почернения каждой ступени измерить не менее трех раз, беря затем среднее из них. Результаты записать в таблицу.

Замечание: В процессе измерений во избежание ошибок не следует допускать попадания постороннего света на панель прибора.

3. Построение характеристической кривой.

По результатам измерений построить на миллиметровой бумаге характеристическую кривую, отложив по оси ординат измеренные плотности почернения D_n фотоэмульсии, а по оси абсцисс величины, характеризующие логарифмы экспозиций $\lg H_n$*, то есть согласно формулы (2.7) величины

$$-(0{,}2 + 0{,}1\, n),$$

где n — номер участка сенситограммы.

По полученному графику рассчитать характеристики фотоэмульсии: широту i и коэффициент контрастности γ.

---

* Напоминаем, что экспозиции H_n выражаем в единицах H_0, которая представляет собой экспозицию в отсутствии сенситометра.

Работа 3

ИЗУЧЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТОЭМУЛЬСИИ

ВВЕДЕНИЕ

Фотографическая эмульсия представляет собой взвесь микрокристалликов галоидного серебра (эмульсионных зерен) в среде защитного слоя коллоида (желатины, альбумина и др.). Фотоэмульсия служит для приготовления светочувствительных слоев различных фотоматериалов путем нанесения ее на спецнальные подложки (пленку, стекло, бумагу).

Свойства фотоэмульсии определяются рядом характеристик*: светочувствительностью, контрастностью, широтой, разрешающей способностью и др.

В данной работе изучается разрешающая способность фотоэмульсии, то есть способность эмульсии давать раздельное изображение достаточно близких точек объекта.

Разрешающая способность фотоэмульсии зависит от свойств самой эмульсии, а также от условий фотосъемки и способа фотохимической обработки. Под воздействием проявителя в зернах эмульсии, подвергнутых действию света, происходит процесс восстановления галоидного серебра до металлического серебра. Серебро, выделяющееся в виде мельчайших кристалликов, образует видимое изображение.

Зернистое строение эмульсии приводит к зернистой структуре получающегося изображения, в результате чего наименьшая деталь объекта, запечатленная в фотослое, не может быть меньше размеров эмульсионного зерна. Кроме того, эмульсионные зерна в процессе проявления изменяют свою форму и размеры, искажая тем самым контуры и размеры деталей изображения. Эти искажения для каждой фотоэмульсии зависят как от состава и температуры проявителя, так и от времени проявления.

---

* Более подробно см. во введении к предыдущей работе.

Значительные искажения вносит разрушающее влияние эмульсионных зерен, подвергшихся интенсивному облучению, на соседние незатронутые излучением зерна. В результате разрешающая способность понижается как при малых экспозициях — недодержках, когда почернение недостаточно для получения отчетливого изображения, так и при больших экспозициях—передержках, когда границы почернения расширяются, что приводят к слиянию точек изображения.

Однако при соответствующих экспозициях и хорошо подобранных режимах проявления, можно получить наиболее высокую разрешающую способность для каждой фотоэмульсии.

В данной работе изучается характер зависимости разрешающей способности фотоэмульсии от времени экспозиции (при постоянстве всех прочих факторов) и определяется оптимальное время экспозиции в условиях опыта.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В качестве исследуемого фотографического материала применяется позитивная кинопленка. Эмульсия этой пленки чувствительна к сине-фиолетовой части спектра, что позволяет производить всю работу с ней (за исключением экспонирования) при освещении красным светом.

Объектом для съемок является специальная шкала, так называемая *мира*.

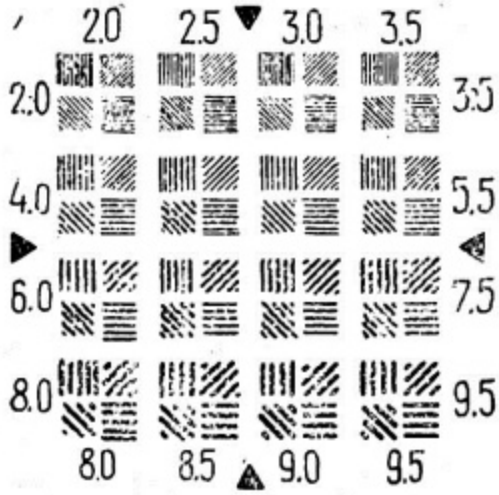

Рис. 3-1

Мира представляет собой набор заштрихованных квадратов, расположенных в группы по четыре (рис. 3.1). Квадраты

внутри группы отличаются шириной штрихов и расстоянием между ними. Около каждой группы квадратов имеются цифры, соответствующие расстояниям между штрихами.

Фотосъемка миры производится на специальной установке, оптическая схема которой представлена на рис. 3.2. Свет от источника *И* проходит через конденсор *К* и освещает миру *М*. С помощью системы линз *П* в передней фокальной плоскости *Ф* коллиматорного объектива *Кол* образуется промежуточное изображение миры. Из коллиматорного объектива свет попадает в объектив *Об* съемочной камеры, давая изображение миры в фокальной плоскости этого объектива. Для рассматривания полученного изображения служит съемный окуляр *Ок*.

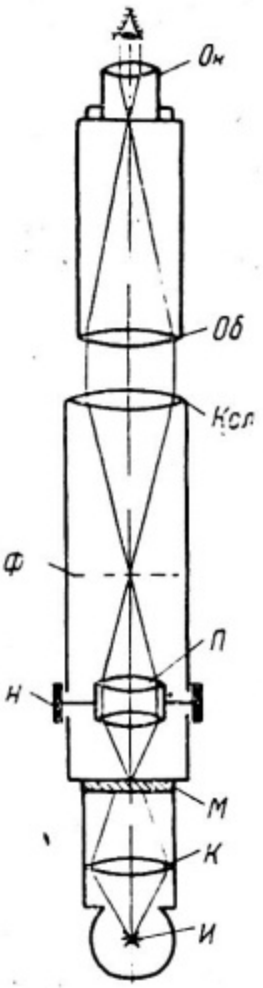

Рис. 3-2

Установка позволяет варьировать увеличение наблюдаемого изображения. Для этой цели служит накатанное кольцо *Н*. Вращение его изменяет расстояние между линзами *П*, причем таким образом, что промежуточное изображение *Ф* меняется лишь по величине, оставаясь в фокальной плоскости коллиматорного объектива (такая система называется *панкратической*). В результате увеличение наблюдаемого изображения изменяется, а фокусировка его остается постоянной.

При фотосъемке вместо окуляра *Ок* вставляется специальная кассета с фотопленкой (рис. 3.3). Кассета состоит из направляющей *1* с отверстием *2*, через которое производится фотографирование, и передвижной планки *3*, под которой располагается фотопленка. Планка с фотопленкой может перемещаться вдоль направляющей.

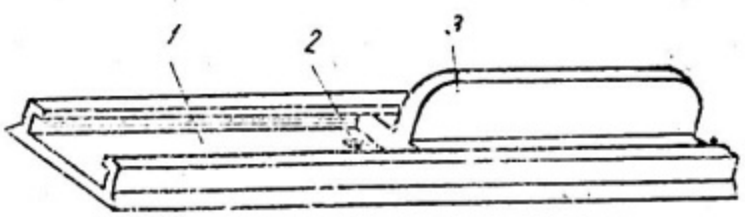

Рис. 3-3

Определение разрешающей способности фотопленки производится при помощи специального микроскопа, проектирующего изображение полученного снимка на матовый экран.

Задание

1. Получение контрольных снимков

Вставив в паз съемочной камеры окулярную насадку, включить лампу осветителя. Наблюдая через окуляр, привести изображение миры в центр поля зрения путем перемещения самой миры. Вращением накатанного кольца панкратической системы установить размеры изображения миры таким, чтобы последним квадратом (с наименьшим номером), в котором штрихи на-глаз еще разрешаются, был квадрат 5.5. После этого лампу осветителя выключить.

Затем в фотокабине зарядить кассету фотопленкой. Для этого следует выдвинуть планку из направляющей, снять вкладыш с прямоугольным окошком и вложить в него фотопленку (эмульсией к окошку). Затем собрать кассету, вдвинув планку до упора.

Далее установить кассету на место окулярной насадки так, чтобы изображение миры располагалось в центре прямоугольного отверстия направляющей. В этом положении направляющую закрепить фиксатором (винтом в пазу).

Выключив осветитель, переместить планку до отметки «1». В этом положении сделать снимок, включив осветитель на 5 сек. Переместив затем планку с фотопленкой последовательно до отметок «2» и «3», сделать еще два снимка соответственно при временах экспозиции в 20 *сек* и 1 *мин*.

Снятую пленку проявить. Фотохимическую обработку пленки вести согласно приложению в конце сборника. Полученные фотоснимки показать преподавателю для получения соответствующих указаний.

2. Определение оптимального времени экспозиции

Зарядив кассету новой пленкой, последовательно произвести фотосъемку миры при 8-ми различных временах экспозиции (время задается преподавателем).

После фотохимической обработки и просушки пленки в сушильном шкафу, полученные фотоснимки тщательно просмотреть через микроскоп. Рассматривая изображение каждого снимка на экране микроскопа, найти тот предельный квадрат, штрихи которого видны вполне отчетливо, т. е. разрешимы (при этом штрихи соседнего квадрата с меньшим номером должны быть уже не разрешимы). Записать цифры, стоящие у предельного квадрата, для каждого фотоснимка.

По полученным данным построить график, отложив по оси абсцисс время экспозиции, а по оси ординат — соответствующие цифры разрешаемых квадратов. Из графика найти значения времени экспозиции, отвечающее наибольшей разрешающей способности исследуемой фотоэмульсии в условиях данного опыта.

Работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает опыт, свет, проходя через любое вещество, испытывает в той или иной степени поглощение. Причем, как правило, поглощение носит селективный характер, т. е. свет различных длин волн поглощается различно.

Поглощение света объясняется тем, что проходящая световая волна вызывает вынужденные колебания электронов в молекулах вещества, на поддержание которых и затрачивается определенная часть световой энергии. По мере проникновения вглубь вещества интенсивность I светового пучка уменьшается по закону

$$I = I_0 e^{-kx}, \tag{4.1}$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на поверхность тела, x — расстояние (от поверхности), на котором интенсивность уменьшается от I_0 до I, k — линейный коэффициент поглощения ($см^{-1}$), зависящий от природы вещества и от длины световой волны λ. Зависимость $k(\lambda)$ выражает спектр поглощения вещества.

В данной работе поглощающий слой создается набором пластин из одного и того же вещества. В этом случае для количественного определения характера поглощения необходимо учесть отражение части светового потока на поверхностях пластин.

Из теории известно, что при нормальном падении света на поверхность раздела двух диэлектриков отношение интенсивности света, прошедшего через поверхность раздела, к интенсивности падающего света (коэффициент прохождения α) определяется следующим выражением:

$$\alpha = \frac{4n}{(n+1)^2}, \tag{4.2}$$

где n — относительный показатель преломления данных диэлектриков (в нашем случае воздух-пластина).

Пусть на исследуемое вещество, представляющее из себя набор отдельных пластин, разделенных узкими промежутками воздуха (рис. 4.1), падает монохроматический свет интенсивности I_0. Тогда интенсивность света I, прошедшего через дан-

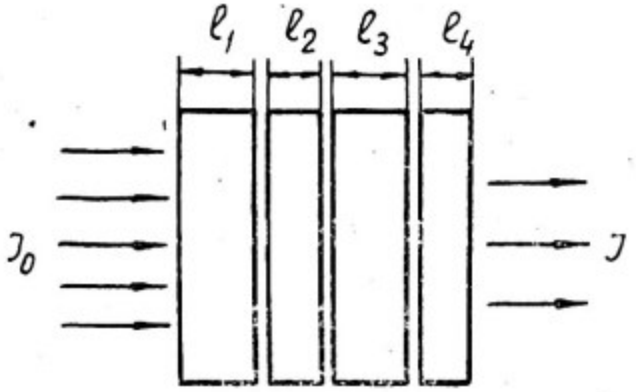

Рис. 4-1

ную стопу пластин, согласно формул (4.1) и (4.2) будет описываться следующим выражением:

$$I = I_0 \alpha^{2m} e^{-k(l_1+l_2+\ldots+l_m)}, \qquad (4.3)$$

где m — число пластин в столе, $2m$ — число отражающих поверхностей, $l_1, l_2, \ldots l_m$ — толщины пластин.

Прологарифмировав последнее выражение, получим формулу для определения коэффициента поглощения k:

$$k = \frac{1}{\Sigma l_i} \ln\left(\frac{I_0 \alpha^{2m}}{I}\right). \qquad (4.4)$$

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В данной работе используется универсальный фотометр ФМ-56. Его действие основано на уравнивании яркостей двух полей, образуемых световыми пучками, один из которых является эталонным, а другой проходит через исследуемое вещество. Соответствующее изменение яркостей служит мерой изменения интенсивности светового пучка, прошедшего через исследуемое вещество. Равенство яркостей полей оценивается визуально.

Оптическая схема фотометра дана на рис. 4.2. Фотометр имеет три основных части: осветитель *Осв,* держатель образцов *Д* и фотометрическую головку *Ф*. Все части фотометра укреплены на штативах, которые могут перемещаться вдоль оптической скамьи.

Как видно из рис. 4.2, свет от лампы накаливания *1* разделяется на два пучка зеркалами *2* и проходит затем через конденсоры *3*. Конденсоры можно перемещать вдоль осей световых пучков, при этом сечение и интенсивность последних изменяется. Далее световые пучки попадают в фотометрическую

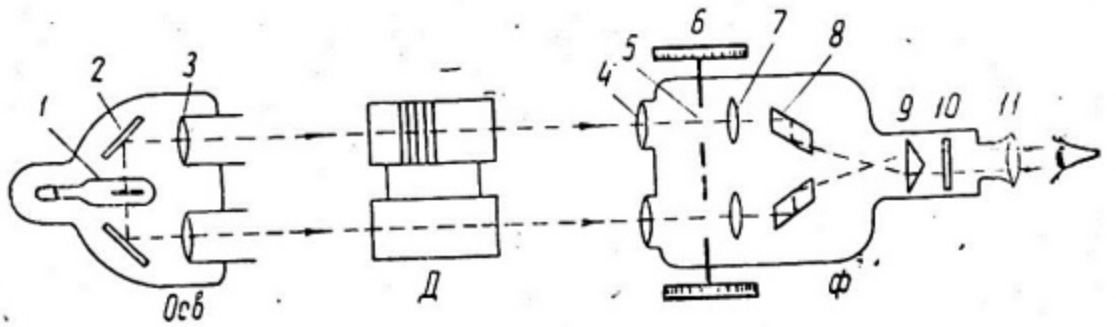

Рис. 4-2

головку *Ф*, где проходят через объективы *4*, диафрагмы *5* (величину отверстий которых можно независимо изменять вращением барабанов *6*) и дополнительные линзы *7*. С помощью призм *8* и биризмы *9* оба пучка приводятся в соприкосновение и, пройдя сменный светофильтр *10*, попадают в окуляр *11*, образуя два поля с резкой границей. Левое поле создается *правым* пучком, правое поле — *левым* пучком.

На барабанах *6* нанесены две шкалы, черная и красная. В работе используется черная шкала — шкала интенсивностей. Шкала имеет деления от 0 до 100. Максимальное раскрытие диафрагм *5* соответствует делению 100.

Смена светофильтров *10* производится поворотом револьверного диска. Каждый светофильтр имеет номер, видимый в специальном окошечке над окуляром. В табл. 4.1 указаны номера и эффективные длины волн света, пропускаемые соответствующими светофильтрами.

Таблица 4.1

№	λ, Å	№	λ, Å
1	7500	6	5400
2	7200	7	5000
3	6600	8	4700
4	6100	9	4200
5	5700		

Задание

1. Настройка прибора

Сняв образцы с держателя *Д*, отодвинуть штатив с осветителем от фотометрической головки на расстояние около 75 *см*. Лампу осветителя через трансформатор включить в сеть.

Поместить листок белой бумаги непосредственно перед объективами *4* и перемещением патрубков с конденсорами получить на бумаге резкие изображения нити лампы. Если центры изображений нити лампы не совпадают с центрами объективов, то следует несколько переместить лампу осветителя (при этом изображения нити будут сдвигаться или раздвигаться).

Поворотом револьверного диска в ход лучей ввести один из красных светофильтров. Окуляр *11* (поворотом его оправы) сфокусировать на резкую видимость границы раздела двух полей. Установив один из барабанов на каком-либо из делений между 40 и 50 (по черной шкале), поворотом другого барабана тщательно уравнять яркости обеих полей. Уравнивание повторить не менее пяти раз, следя при этом за тем, чтобы положение глаза относительно наглазника окуляра не менялось от измерения к измерению. Из полученных отсчетов по шкале барабана найти среднее значение.

Если найденное таким образом положение второго барабана отличается от положения первого барабана более, чем на ± 2 деления, то надо слегка сместить один из конденсоров и повторить измерения.

Аналогичную проверку следует провести для двух-трех других светофильтров. Если для всех выбранных светофильтров уравнивание яркостей полей удовлетворяет указанному выше требованию, то накладку прибора можно считать законченной.

2. Проверка закона поглощения

Штангенциркулем измерить толщины всех пластин. Результаты записать.

Штатив с держателем образцов закрепить на расстоянии 20—40 *см* от фотометрической головки. Установить на держателе *Д* одну из пластин. Положение барабана, расположенного на той же стороне фотометра, что и исследуемая пластина, принять за I_0 * и в дальнейшем не менять.

Вращением другого барабана произвести уравнивание яркостей полей при светофильтре № 3. Осчет по шкале барабана

---

* Помнить, что правое поле окуляра соответствует левому пучку, а левое поле — правому пучку.

дает интенсивность I. Уравнивание яркостей повторить не менее трех раз.

Аналогичные измерения провести затем для двух, трех и т. д. пластин. Результаты измерений занести в таблицу.

Построить график зависимости $\ln\left(\frac{I_0 2^{2m}}{I}\right)$ от толщины слоя вещества l, полагая показатель преломления вещества $n = 1{,}5$. Прямолинейность полученного графика служит подтверждением справедливости закона поглощения, что непосредственно следует из формулы (4.3) или (4.4). Из наклона графика вычислить среднее значение коэффициента поглощения k (в $см^{-1}$) для данной длины волны.

3. Определение зависимости k (λ)

Оставив на держателе одну пластинку, провести уравнивание яркостей полей и соответствующие измерения для всех светофильтров.

Вычислив для каждого светофильтра коэффициент поглощения k [согласно формуле (4.4)], построить график $k(\lambda)$. Найти из полученного графика длину световой волны, отвечающей наибольшей прозрачности исследуемого вещества.

Работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРИЗМЫ ОТ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

ВВЕДЕНИЕ

Показатель преломления представляет собой величину, характеризующую оптические свойства вещества и равную отношению скорости света в вакууме к скорости света в веществе. Он определяется как отношение синуса угла падения светового луча, идущего из вакуума в данное вещество, к синусу угла преломления.

Весьма существенно, что показатель преломления любого вещества зависит не только от свойств самого вещества, но и от длины световой волны.

В данной работе проводится измерение показателя преломления вещества для света различных длин волн. Используемый здесь метод является одним из наиболее точных. Он основан на измерении угла наименьшего отклонения луча, претерпевшего преломление в трехгранной призме.

Пусть луч света падает под углом i (рис. 5.1) на поверхность призмы, преломляющий угол которой A. В результате двух преломлений вышедший из призмы луч света отклонится на угол δ по отношению к направлению падающего луча. Угол δ называется углом отклонения. Он зависит от угла падения i, преломляющего угла призмы A, а также от материала призмы и длины волны света.

Можно показать, что при симметричном ходе луча через призму, когда угол i' равен углу i, угол отклонения принимает минимальное значение. В этом случае луч внутри призмы проходит перпендикулярно биссектрисе угла A, и показатель преломления n призмы выражается следующей формулой:

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\text{мин}}}{2}}{\sin \frac{A}{2}}. \qquad (5.1)$$

Таким образом, если известен угол A, то определение показателя преломления призмы для данной длины световой волны

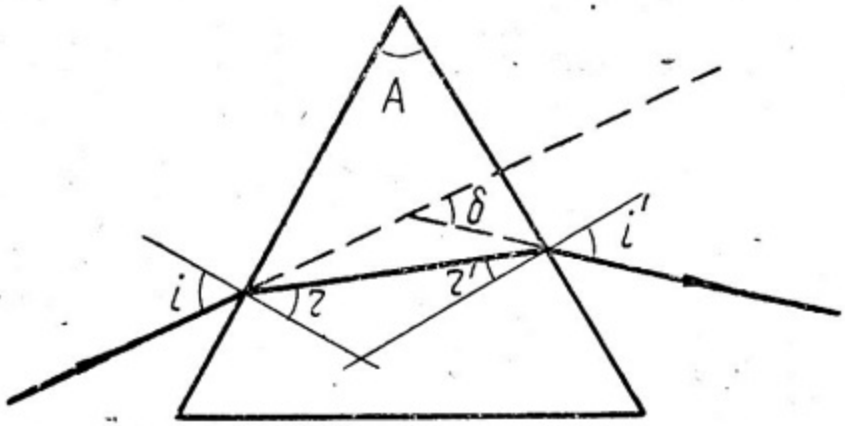

Рис. 5-1

сводится к измерению угла $\delta_{мин}$, величина которого будет различна в зависимости от длины световой волны.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Основной частью установки, используемой в настоящей работе, является *гониометр* — прибор, предназначенный для измерения углов с высокой точностью.

Оптическая схема гониометра (вместе с источником света и исследуемой призмой) показана на рис. 5.2. Здесь *Осв*—осве-

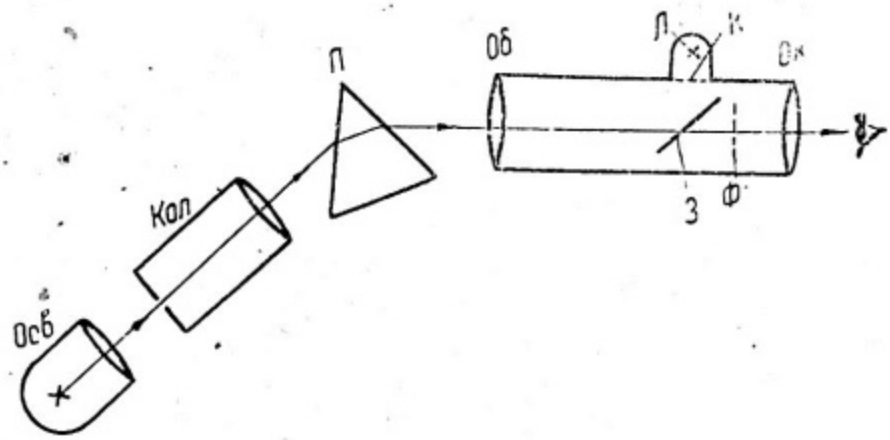

Рис. 5-2

титель (источник света с конденсорной линзой), *Кол* — коллиматор (коллиматорный объектив, в передней фокальной плоскости которого расположена узкая прямоугольная щель) *П* — исследуемая призма, *Об* и *Ок* — объектив и окуляр зри-

тельной трубы. Свет, выходящий из коллиматора параллельным пучком, преломляется в призме и попадает в зрительную трубу, образуя в фокальной плоскости *Ф* ее объектива изображение щели коллиматора. Если источник света испускает лучи нескольких длин волн, то в фокальной плоскости объектива зрительной трубы образуется ряд изображений щели коллиматора, соответствующих этим длинам волн (линейчатый спектр). Наблюдение спектра производится через окуляр *Ок*.

Окуляр зрительной трубы снабжен так называемым *автоколлимационным* устройством, позволяющим устанавливать ось трубы строго перпендикулярно некоторой плоскости, например, грани призмы. Принцип действия этого устройства в следующем. Лампочка *Л* освещает прозрачный крест нанесенный на пластинке *К*. Прошедшие лучи отражаются от полупрозрачного зеркала *3* и выходят из объектива *Об*. Так как крест *К* помещен в фокальной плоскости объектива *Об*, то выходящий световой пучок будет параллельным. Отразившись от плоской грани объекта, пучок возвращается в трубу и в фокальной плоскости *Ф* образует изображение креста *К*. Если грань объекта строго перпендикулярна оси трубы, то изображение креста *К* совместится с визирным крестом, расположенным в фокальной плоскости *Ф*.

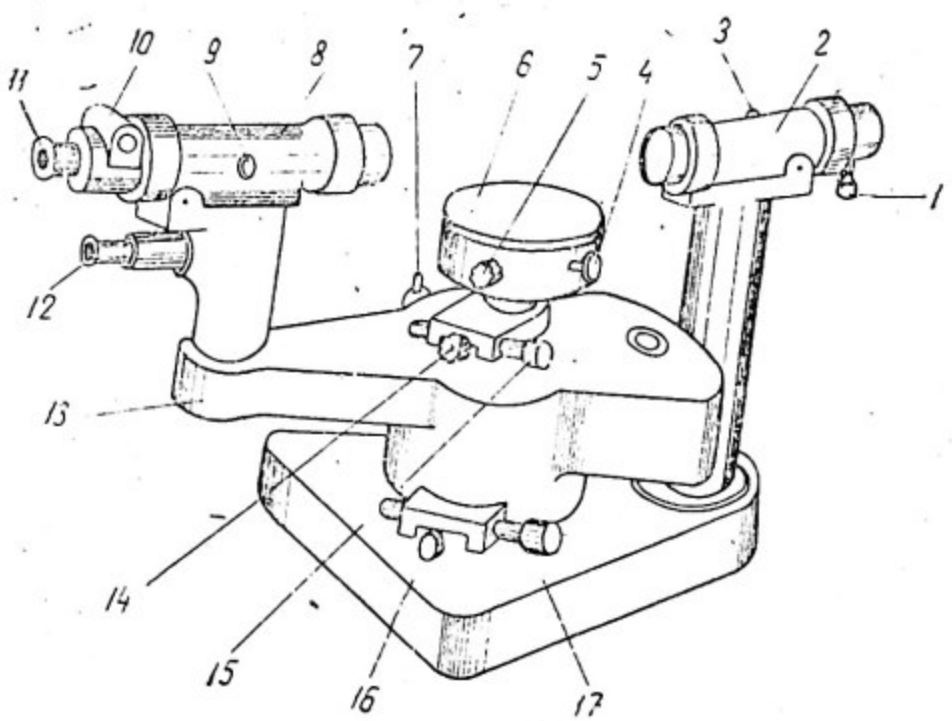

Рис. 5-3

Внешний вид гониометра дан на рис. 5.3. Здесь *2* — коллиматор, ширина входной щели которого регулируется микрометром *1*; *3* — фокусировочный винт коллиматора; *6* — предмет-

ный столик, наклон горизонтальной поверхности которого регулируется двумя уравнительными винтами *4* (на рисунке виден только один винт); *8* — зрительная труба с фокусирующим винтом *9*; *10* — осветитель автоколлимационного устройства; *11* — окуляр трубы; *12* — отсчетная лупа, через которую производятся отсчеты по шкале лимба, находящегося внутри прибора.

Зрительная труба укреплена на подвижном кронштейне *13*, которой можно поворачивать вокруг вертикальной оси, проходящей через центр столика *6*. Поворот трубы осуществляется от руки после освобождения стопорного винта *16*. При закрепленном винте *16* можно производить тонкое перемещение трубы винтом *17*.

Стопорный винт *14* служит для закрепления лимба на оси прибора. При этом винтом *15* можно осуществлять тонкое перемещение лимба. Стопорный винт *5* скрепляет столик прибора с лимбом. Фиксатор *7* в опущенном положении связывает (не жестко) поворот зрительной трубы вместе с лимбом. Действие стопорных винтов *5*, *14* и *16*, а также фиксатора *7* поясняет схема на рис. 5-4, где *С* — столик гониометра, *Л*—лимб, *3* — кронштейн зрительной трубы, *О* — ось прибора.

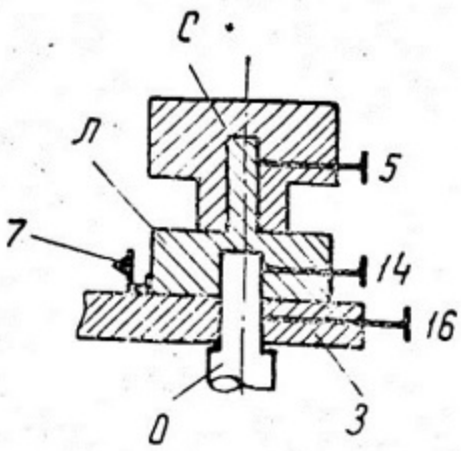

Рис. 5-4

Лимб прибора снабжен шкалой с градусными делениями. Отсчет производится по шкале, находящейся в поле зрения отсчетной лупы *12*. Цена деления шкалы 1′. Наличие нижней шкалы сдвинутой относительно верхней на половину деления, дает возможность производить отсчет с точностью до 0,5′. Отсчет градусов берется по цифре стоящей под тем штрихом шкалы лимба, который попадает в пределы отсчетной шкалы лупы, отсчет минут—по верхней шкале лупы.

Источником света в данной работе служит ртутная лампа, дающая в видимой части спектра пять линий (в Å):

4047 — фиолетовая,
4358 — сине-фиолетовая (слабая),
5461 — зеленая,
5769 — желтая,
5790 — желтая.

К установке прилагается толстая стеклянная пластинка, служащая для настройки автоколлимационного устройства.

Задание

1. Измерение преломляющего угла призмы

В данной работе преломляющий угол призмы определяется автоколлимационным методом путем измерения угла между нормалями к преломляющим граням.

Работа начинается с наладки автоколлимационного устройства. Вращением накатанного кольца окуляра добиться четкого видения визирного креста в поле зрения окуляра. Включив затем освещение автоколлимационного устройства, приложить к оправе объектива зрительной трубы юстировочную стеклянную пластинку. Вращением фокусировочного винта зрительной трубы и изменением положения лампочки *10* (рис. 5-3) получить четкое изображение светлого креста, после чего юстировочную пластинку убрать.

Поместить исследуемую призму на середину столика гониометра так, чтобы ребро преломляющего угла призмы делило приблизительно пополам расстояние между уравнительными винтами столика.

Закрепив зрительную трубу стопорным винтом *16* в положении, удобном для наблюдения, повернуть затем столик гониометра так, чтобы одна из преломляющих граней призмы была бы обращена к трубе. Слегка вращая столик, добиться получения в поле зрения окуляра изображения светлого креста. Если при этом изображение светлого креста не появляется, то следует повернуть немного уравнительный винт столика, расположенный под данной гранью призмы, одновременно слегка вращая столик. Полученное изображение светлого креста совместить с визирным крестом.

Затем повернуть столик противоположной преломляющей гранью призмы к трубе. Если изображение светлого креста в этом положении не совпадает с визирным крестом, то вращением уравнительного винта столика, находящегося под данной гранью призмы, уменьшить расстояние между крестами наполовину. Вернувшись к первой грани, аналогичным образом вновь уменьшить расстояние между крестами наполовину. Повторением данной операции добиться полного совпадения крестов при отражении от обеих граней призмы.

После этого поднять фиксатор *7* (рис. 5-3) вверх. Установить столик с призмой так, чтобы одна из преломляющих граней стала перпендикулярна оси трубы. Закрепив затем стопорные винты *5* и *14*, вращением винта тонкой наводки *15*, добиться точного совмещения крестов, после чего сделать отсчет по шкале лимба.

Раскрепив затем стопорный винт *14*, повернуть столик противоположной преломляющей гранью к трубе, опять закрепить

стопорный винт *14* и вращением винта *15* снова совместить кресты. Сделать соответствующий отсчет. Данную операцию проделать не менее трех раз.

Определив по разности отсчетов угол α между нормалями к преломляющим граням призмы *, вычислить затем ее преломляющий угол A по формуле

$$A = 180° = \alpha.$$

2. Измерение углов наименьшего отклонения

Включить ртутную лампу. Закрепив лимб стопорным винтом *14*, освободить стопоры *5* и *16*, чтобы столик и зрительная труба могли вращаться независимо от лимба.

Открыть щель коллиматора (на ширину около 0,2 *мм*), проверить равномерность освещения щели. Повернуть столик с призмой так, чтобы биссектриса преломляющего угла призмы образовала тупой угол с осью коллиматора. Глядя на призму невооруженным глазом, отыскать положение цветного спектра. Установив зрительную трубу в этом положении и действуя фокусировочными винтами *3* и *9*, а также уменьшая ширину коллиматорной щели, получить четкие и узкие линии спектра.

Затем, осторожно поворачивая столик с призмой и наблюдая через зрительную трубу за перемещением одной из линий спектра (например, фиолетовой), добиться такого положения, при котором линия остановится. Это положение отвечает углу наименьшего отклонения для соответствующей длины волны. Совместив центр визирного креста с серединой данной линии, сделать отсчет α по шкале лимба.

Аналогичную операцию проделать не менее трех раз для всех видимых линий спектра. При отсчетах каждую линию спектра следует фокусировать отдельно (винтом *9*), а совмещение креста с линиями производить винтом тонкой наводки *17*, предварительно закрепляя каждый раз стопорный винт *16*.

Далее вывести призму из хода лучей, повернуть зрительную трубу навстречу коллиматору и совместить центр визирного креста трубы с серединой изображения коллиматорной щели (белая ахроматическая полоса).

Снять отсчет α_0 по шкале лимба (α_0 отвечает направлению падающего на призму пучка). Данное измерение повторить не менее трех раз.

---

* Если между отсчетами α_1 и α_2 шкала лимба содержит нулевое (оно же 360-градусное) деление, то угол α между соответствующими направлениями вычисляется по формуле:

$$\alpha = 360° - |\alpha_2 - \alpha_1|.$$

Из разности отсчетов α и α_0 (см. сноску на стр. 34) вычислить значение угла наименьшего отклонения $\delta_{мин}$ для каждой линии спектра.

3. Определение показателя преломления призмы для разных длин волн

Пользуясь формулой (5.1), определить значения показателя преломления n данной призмы для указанных выше длин волн λ.

Построить график зависимости n от λ.

Работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ И УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕЛЕОБЪЕКТИВА

ВВЕДЕНИЕ

Оптические системы обычно состоят из ряда сферических поверхностей — преломляющих и отражающих. Прямая, на которой находятся центры кривизны данных поверхностей, представляет собой ось симметрии центрированной системы и называется *главной оптической осью* системы.

В случае идеальной оптической системы каждая точка в пространстве предметов отображается соответствующей точкой в пространстве изображений. Такие точки называются *сопряженными.* Аналогично каждому лучу в пространстве предметов соответствует сопряженный луч в пространстве изображений.

Построение изображений и анализ сколь угодно сложных оптических систем резко облегчается, если систему характеризовать шестью (в общем случае) так называемыми *кардинальными точками:* передний и задний *главные фокусы,* первая и вторая *главные точки,* первая и вторая *узловые точки.* Рассмотрим свойство этих точек.

Пусть на оптическую систему (рис. 6-1) падает, например, слева, пучок лучей, параллельных главной оптической оси. После преломления в системе эти лучи соберутся в точку F_2 — *второй* или *задний главный фокус* системы. Аналогично получим точку F_1 — *первый* или *передний главный фокус* системы, если пучок параллельных лучей направить на систему с другой стороны.

Если поместить предмет B_1H_1 (рис. 6-1) в такую точку H_1 на главной оптической оси системы, что изображение его B_2H_2 будет прямым и равным по величине самому предмету, то сопряженные точки H_1 и H_2 будут являться *главными точками* системы (первая и вторая). Таким образом, линейное (или поперечное) увеличение β, представляющее собой отношение

линейных размеров изображения y_2 и предмета y_1, равно по определению для главных точек единице, т. е. $\beta = \frac{y_2}{y_1} = +1$.

Расстояние от первой главной точки H_1 до первого главного фокуса F_1 называется первым фокусным расстоянием f_1. Соответственно расстояние от точки H_2 до точки F_2 — вторым фокусным расстоянием f_2.

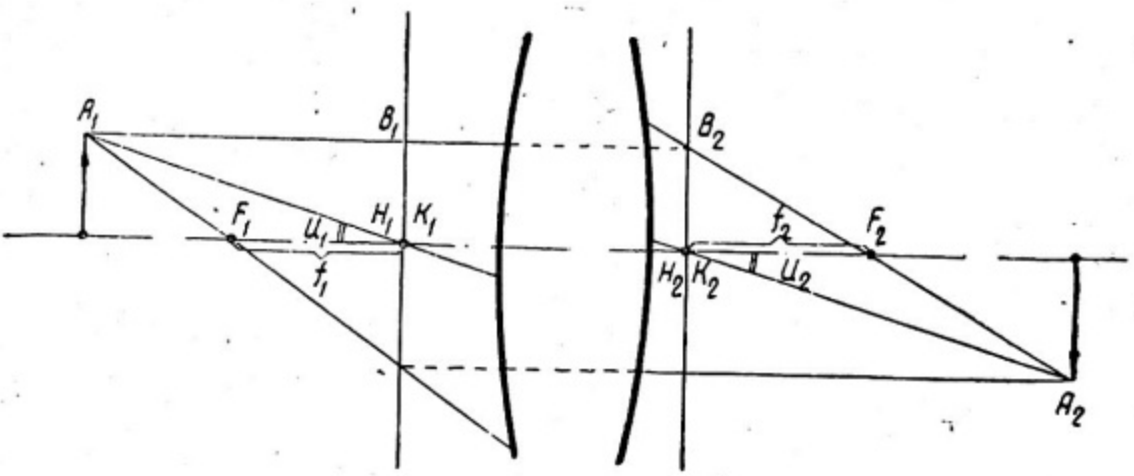

Рис. 6-1

И, наконец, *узловые точки*. Это такие две точки K_1 и K_2 на главной оптической оси системы, которые обладают следующим свойством: сопряженные лучи, проходящие через них, параллельны друг другу. Если показатели преломления сред слева и справа от оптической системы одинаковы, то узловые точки совпадают с главными. Этому случаю отвечает рис. 6-1, где точка K_1 совпадает с точкой H_1, точка K_2 — с точкой H_2, а фокусные расстояния f_1 и f_2 одинаковы.

Плоскости, проведенные через фокусы, главные и узловые точки перпендикулярно главной оптической оси, называются соответственно *фокальными, главными* и *узловыми плоскостями*. Они являются кардинальными плоскостями оптической системы.

В общем случае расположение главных плоскостей может быть самым различным относительно оптической системы. Несимметричное расположение главных плоскостей имеет место, в частности, для исследуемой в данной работе системы — телеобъектива. Телеобъектив применяется при съемке удаленных предметов в крупном масштабе, а также при портретной съемке.

Телеобъектив представляет собой комбинацию положительной и отрицательной оптических систем (рис. 6-2). Главные плоскости данной системы вынесены за ее пределы, благодаря чему система является длиннофокусной и с укороченным зад-

ним вершинным отрезком l_2 (расстояние от задней сферической поверхности до изображения). Это позволяет получать телеувеличение, определяемое как

$$\gamma = \frac{f_2}{l_2}, \qquad (6.1)$$

в несколько крат.

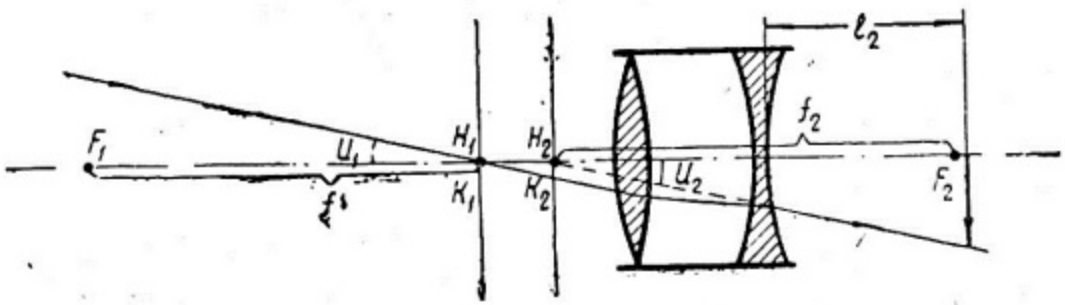

Рис. 6-2

Определение главных точек оптической системы. Если система находится в воздухе, т. е. показатели преломления среды слева и справа от системы одинаковы, то, как указывалось выше, главные точки H_1 и H_2 совпадают с узловыми K_1 и K_2. Поэтому для определения главных точек достаточно в данном случае найти положение узловых точек системы. Для этого можно использовать следующее свойство узловых точек: при повороте телеобъектива вокруг оси, перпендикулярной главной оптической оси системы и проходящей через заднюю узловую точку K_2, смещение изображения будет *минимальным* (изображение практически будет оставаться неподвижным). Отсюда, очевидно, достаточно найти положение оси вращения системы, при повороте вокруг которой изображение не смещается. Этим самым определяется положение точки K_2, а следовательно и точки H_2.

Повернув телеобъектив на 180°, аналогичным образом можно определить и положение точек K_1 и H_1.

Определение фокусных расстояний оптической системы. Метод, применяемый в данной работе, заключается в следующем. Если установить экран $Э$ (рис. 6-3) на достаточно большом расстоянии от предмета y_1, то можно получить резкое изображение предмета на экране при двух положениях оптической системы (I и II). В положении I изображение будет увеличенным, в положении II — уменьшенным.

Не трудно убедиться в том, что при этом оба положения (I и II) главных плоскостей оптической системы будут симметричными относительно середины расстояния между пред-

метом и изображением (экраном), а линейные увеличения β_I и β_{II} взаимно обратными, т. е.

$$\beta_{II} = \frac{1}{\beta_I}. \tag{6.2}$$

Из рис. 6-3 видно, что по абсолютной величине

$$\beta_I = \frac{x_2}{f_2} \text{ и } \beta_{II} = \frac{x_2'}{f_2}. \tag{6.3}$$

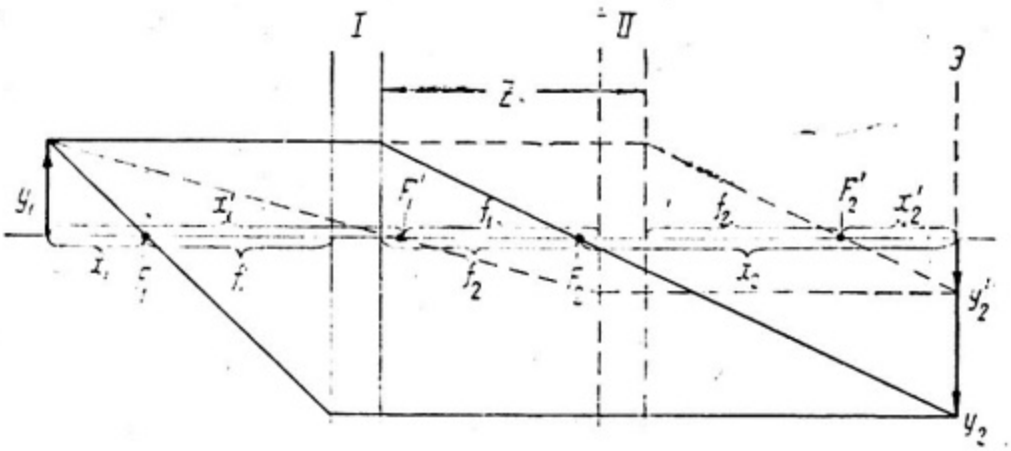

Рис. 6-3

Кроме того, из этого же рисунка следует, что, если перемещение оптической системы равно z, то $f_2 + x_2 = z + f_2 + x_2'$ откуда

$$z = x_2 - x_2'. \tag{6.4}$$

Комбинируя формулы (6.3) и (6.4), находим

$$f_2 = \frac{z}{\beta_I - \beta_{II}}. \tag{6.5}$$

Таким образом, для определения фокусного расстояния системы достаточно измерить линейные увеличения при двух положениях системы и расстояние z между этими положениями.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемая в данной работе установка носит название *оптической скамьи.* Она представляет собой массивную направляющую *1* (рис. 6-4), на которую устанавливаются рейтеры (держатели) с различными оптическими элементами: осветитель со светофильтром *2,* предметная шкала *3,* коллима-

тор *4*, телеобъектив *5* и лупа *6* с дополнительным объективом *7*.

Оптическая скамья снабжена отсчетной миллиметровой шкалой.

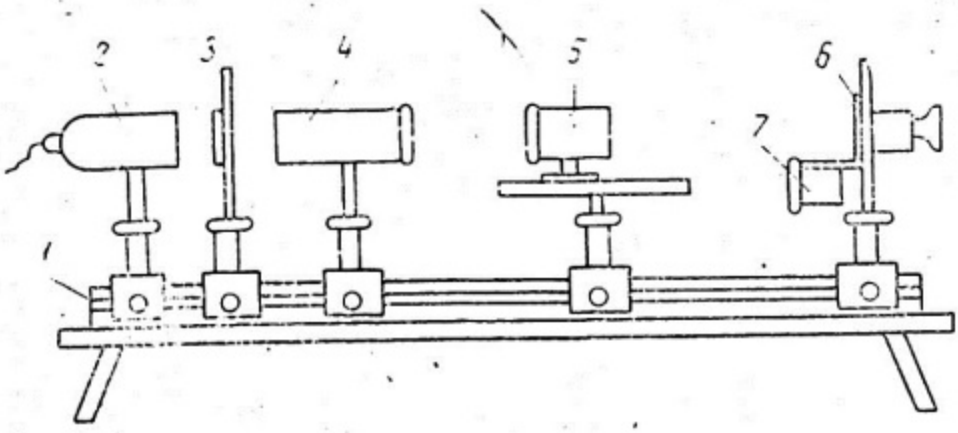

Рис. 6-4

В фокальной плоскости коллиматорного объектива расположена стеклянная пластинка с крестом нитей. Коллиматор позволяет наблюдать объект (крест нитей) в параллельных лучах, что эквивалентно удалению объекта на бесконечность.

Телеобъектив *5* имеет специальные салазки, позволяющие перемещать его по направляющим рейтера. Направляющие рейтера снабжены миллиметровой шкалой, нуль которой совпадает с осью вращения рейтера. Указатель на салазках соответствует вершине сферической поверхности *положительной* линзы телеобъектива.

Лупа *6* снабжена отсчетной шкалой, цена деления которой равна цене деления предметной шкалы *3*.

Задание

1. Определение главных точек телеобъектива

Поместить на оптическую скамью осветитель *2*, коллиматор *4*, телеобъектив *5* (положительной линзой к объективу коллиматора) и лупу *6*. Произвести наладку установки: установить на-глаз возможно точнее на одном уровне все эти элементы, приблизив их друг к другу, включить осветитель и тщательно сфокусировать шкалу лупы вращением ее оправы.

Отцентрировав систему, переместить осветитель на один конец оптической скамьи, лупу — на другой конец. Коллиматор установить непосредственно перед осветителем. Перемещая затем рейтер с телеобъективом, добиться получения отчетливого изображения креста коллиматора в поле зрения лупы. Необходимо проследить за тем, чтобы изображение креста кол-

лиматора наблюдалось без параллакса относительно шкалы лупы. Отсутствие параллакса легко проверить покачиванием головы: изображение креста и шкала лупы при этом не должны перемещаться относительно друг друга. Устранение параллакса достигается дополнительным перемещение телеобъектива.

Поворачивая телеобъектив вокруг оси рейтера на небольшие углы в обе стороны и медленно перемещая салазки по направляющим, найти такое положение телеобъектива, при котором при поворотах телеобъектива изображение креста будет оставаться неподвижным. Следует иметь в виду, что при смещении телеобъектива вдоль направляющих в какую-либо сторону рейтер нужно передвигать в противоположную сторону на такое же расстояние, чтобы крест коллиматора был все время виден резко в поле зрения лупы. Неподвижность изображения креста при поворотах телеобъектива показывает, что ось рейтера совпала со второй узловой, а следовательно и второй главной точкой телеобъектива. В этом положении сделать отсчет a_2 по указателю на салазках. Этот отсчет соответствует расстоянию от передней сферической поверхности положительной линзы телеобъектива до его второй главной точки H_2.

Повернув телеобъектив на 180°, добиться тем же методом резкого и неподвижного (при поворотах телеобъектива) изображения креста коллиматора в поле зрения лупы. Сделать отсчет a_1 по указателю на салазках, соответствующий положению первой главной точки H_1 относительно той же поверхности телеобъектива.

Проделав данные измерения не менее трех раз для каждого случая, вычислить средние значения a_2 и a_1.

2. Определение главных фокусных расстояний телеобъектива

Заменить коллиматор предметной шкалой, придвинув последнюю непосредственно к осветителю. Повернуть телеобъектив положительной линзой к предметной шкале и отцентрировать систему.

Получив резкое уменьшенное изображение предметной шкалы (без параллакса), отсчитать число делений шкалы лупы, совпадающих с числом делений предметной шкалы. По указателю рейтера телеобъектива записать его положение по миллиметровой шкале оптической скамьи. Проделать аналогичные измерения, переместив рейтер с телеобъективом к предметной шкале и получив резкое увеличенное изображение этой шкалы (без параллакса). Измерения повторить не менее трех раз. По полученным данным вычислить увеличения β_I и β_{II}, помня, что шкала лупы и предметная шкала имеют одинаковую цену деления.

Убедившись, что полученные значения β_I и β_{II} удовлетворяют условию (6.2), вычислить по формуле (6.5) фокусное расстояние f_2.

Повернув телеобъектив на 180°, повторить все измерения вновь и вычислить фокусное расстояние f_1. Из полученных значений f_1 и f_2 вычислить среднее значение главного фокусного расстояния телеобъектива.

3. Определение увеличения телеобъектива

Чтобы определить увеличение телеобъектива (6.1) необходимо, кроме фокусного расстояния, измерить задний вершинный отрезок l_2 (рис. 6-2). Для этого следует снова заменить предметную шкалу коллиматором, ввести затем в ход лучей дополнительный объектив 7 (рис. 6-4) и повернуть телеобъектив положительной линзой к осветителю. Передвигая рейтер с лупой, получить резкое изображение креста коллиматора. Сделать отсчет b_1 по шкале оптической скамьи с помощью указателя на рейтере лупы. Затем, перемещая рейтер с лупой к телеобъективу, получить резкое изображение метки, находящейся на задней поверхности отрицательной линзы телеобъектива. Сделать аналогичный отсчет b_2. Повторить измерения три раза и получить средние значения $\overline{b_1}$ и $\overline{b_2}$. Очевидно, разность $|\overline{b_1} - \overline{b_2}|$ и определяет величину вершинного отрезка l_2.

По формуле (6.1) найти увеличение телеобъектива.

Вычертить в масштабе оптическую схему телеобъектива — положение главных фокусов и главных плоскостей относительно поверхности положительной линзы (с указанием размеров).

Работа 7

ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ И ТЕЛЕСКОПА МАКСУТОВА

ВВЕДЕНИЕ

Зрительная труба (и в частности телескоп) представляет собой оптический прибор, предназначенный для наблюдения удаленных объектов. Принципиальная оптическая схема зрительной трубы (телескопа) состоит из двух основных элементов: длиннофокусного объектива *Об* (рис. 7-1) и короткофокусного окуляра *Ок*. Объектив создает действительное, обратное,

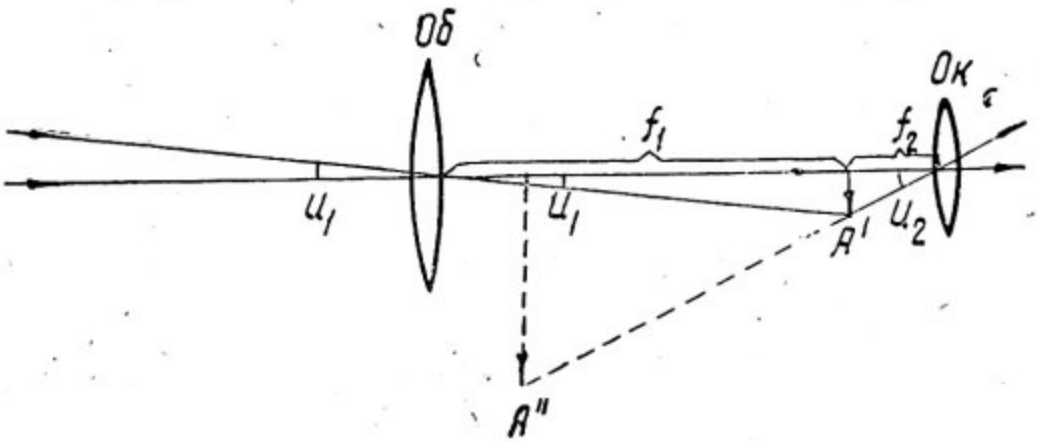

Рис. 7-1

уменьшенное изображение A' наблюдаемого объекта, которое рассматривается в окуляр, как через лупу. В результате наблюдатель видит мнимое увеличенное изображение A''.

Объектив и окуляр расположены относительно друг друга так, что их фокусы (задний фокус объектива и передний фокус окуляра) практически совпадают. Такая система называется телескопической.

Основными характеристиками зрительной трубы являются: увеличение, действующее отверстие объектива и его светосила, поле зрения и разрешающая способность.

Увеличением γ зрительной трубы называется отношение тангенса угла u_2, под которым объект виден в трубу, к тангенсу угла u_1, под которым данный объект виден невооруженным глазом (рис. 7.1):

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u_2}{\operatorname{tg} u_1}. \qquad (7.1)$$

Действующим отверстием зрительной трубы, или *входным зрачком,* называется сечение того пучка лучей, падающего на объектив, который целиком проходит всю систему. Отверстие объектива не всегда является действующим, так как внутри системы могут быть диафрагмы, ограничивающие пучок, вошедший в данную систему. В некоторой плоскости за окуляром (рис. 7-2) получается изображение $A'B'$ той оправы (или диафрагмы) AB, которая определяет действующее отверстие.

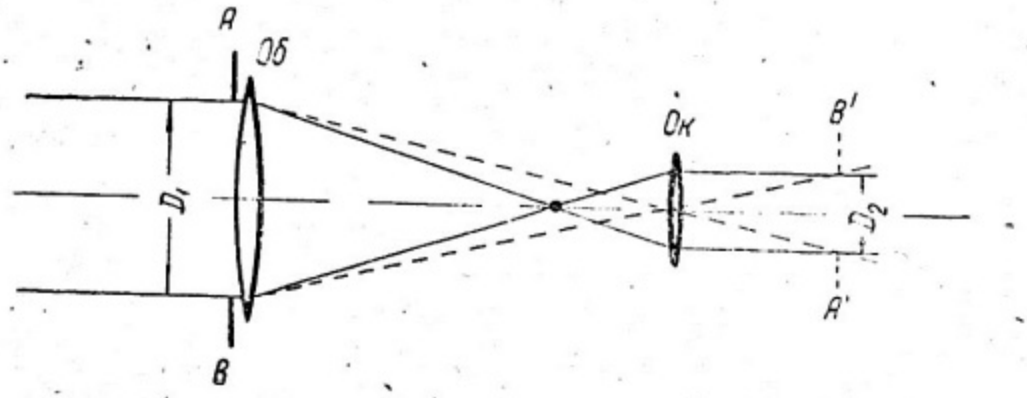

Рис. 7-2

Сечение светового́ пучка этой плоскостью называется *выходным зрачком* системы. Зная диаметры входного и выходного зрачков зрительной трубы (D_1 и D_2) можно показать, что увеличение трубы

$$\gamma = \frac{D_1}{D_2}. \qquad (7.2)$$

Действительно из формулы (7.1) и рис. 7-1 следует, что $\gamma = f_1/f_2$. Отношение же f_1/f_2, согласно рис. 7-2, равно отношению D_1/D_2, откуда и получаем формулу (7.2).

Обычно действующим отверстием зрительной трубы является отверстие, ограниченное оправой объектива.

Светосилой объектива C называется отношение диаметра действующего отверстия объектива к его фокусному расстоянию:

$$C = \frac{D_1}{f_1}. \qquad (7.3)$$

Полем зрения называется область пространства, видимая в зрительную трубу. Эта область имеет вид конуса с вершиной в глазу наблюдателя. Поле зрения характеризуют угловым диаметром, равным углу раствора указанного конуса.

Разрешающей способностью A зрительной трубы называется величина, обратная предельному углу $\psi_{пред}$, характеризующему угловое расстояние между двумя еще различимыми (разрешимыми) в трубу точками или штрихами рассматриваемого объекта:

$$A = \frac{1}{\psi_{пред}}, \qquad (7.4)$$

где угол $\psi_{пред}$ выражается в радианах. Разрешающая способность зависит от совершенства оптической системы, диаметра объектива трубы, освещенности наблюдаемого объекта, свойств глаза наблюдателя и др.

Рассмотрим теперь несколько подробнее зрительные трубы, предназначенные для астрономических наблюдений, — *телескопы*. Отличительной особенностью этих приборов является большой диаметр объектива, позволяющий обеспечить большие значения увеличения, светосилы и разрешающей способности.

Телескопы подразделяются на два типа — *рефракторы* и *рефлекторы*. В рефракторах в качестве объектива используется линза (как в обычной зрительной трубе), в рефлекторах же роль объектива выполняет отражатель — вогнутое зеркало.

Преимуществом рефлекторов, наряду с бо́льшей простотой изготовления, является отсутствие хроматической аберрации (как в каждой зеркальной системе). Однако при сферической форме зеркал весьма значительные помехи качества изображения вызывает сферическая аберрация, поэтому в хороших рефлекторах зеркала изготовляют асферическими, что технически значительно сложнее.

Весьма удачным решением задачи получения превосходных в оптическом отношении и сравнительно простых в изготовлении систем являются смешанные системы, где зеркальная оптика сочетается с линзовой, приводя к весьма полному устранению ряда аберраций. Наиболее совершенной системой этого рода является менисковый *телескоп Максутова* (рис. 7-3), где отражательное сферическое зеркало *З* сочетается с мениском *М* (вогнуто-выпуклая линза со сферическими поверхностями). Мениск имеет везде приблизительно одинаковую толщину и рассчитан так, что его аберрации (главным образом сферические) компенсируют аберрации зеркала.

Как видно из рис. 7-3 пучок параллельных лучей, идущих от удаленного объекта, проходит мениск *М*, отражается от зеркала *З*, затем от зеркала *А* (алюминированная центральная

часть мениска) и образует в фокальной плоскости объектива телескопа изображение объекта, рассматриваемое через оку-

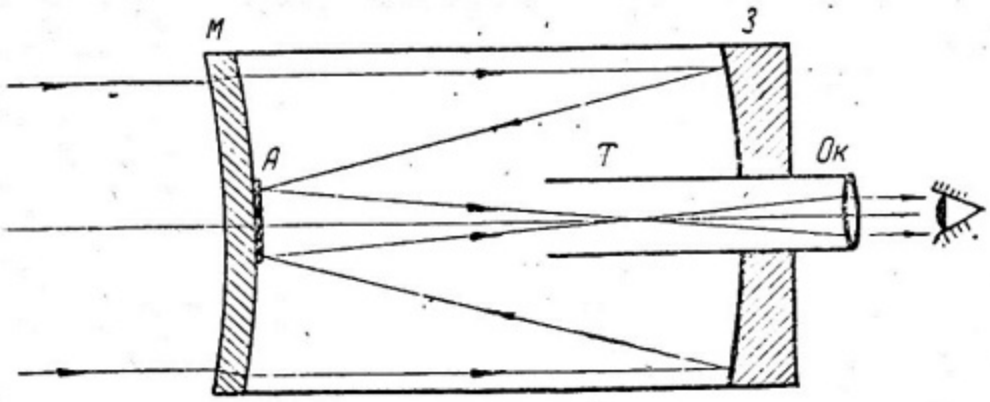

Рис. 7-3

ляр *Ок*. Труба *Т* предохраняет поле зрения от засвечивания и бликов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемая в настоящей работе установка состоит из трех основных частей: осветителя *Осв*, (рис. 7-4), коллиматора *Кол* и телескопа Максутова *ТМ**. Осветитель (источник

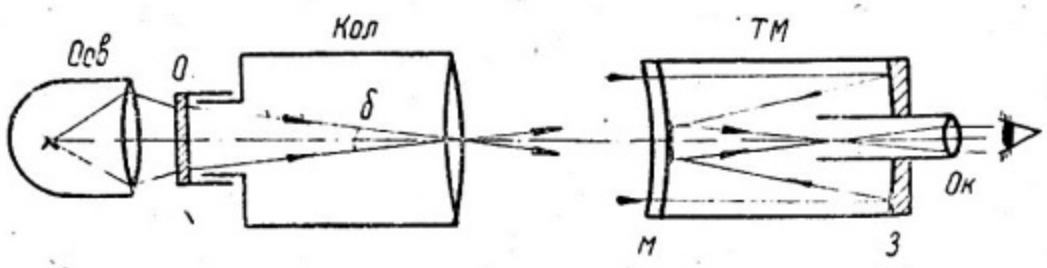

Рис. 7-4

света и конденсорная линза) служит для освещения объекта *О*, помещаемого в переднюю фокальную плоскость коллиматорного объектива. Благодаря коллиматору наблюдаемый объект *О* как бы удаляется на бесконечность и тем самым создаются условия, необходимые для работы с телескопом. Телескоп имеет два сменных окуляра (25^{x} и 70^{x}), введение которых в ход лучей достигается простым поворотом револьверного диска. Регулировка направления телескопа осуществляется вращением специальных винтов.

К установке прилагаются: предметная шкала с ценой деления 0,1 *мм*, окулярная насадка со шкалой (цена деления шка-

* В одном из вариантов установки вместо телескопа используется зрительная труба кепплеровского типа.

лы 0,1 *мм*), малая зрительная труба, мира (набор заштрихованных квадратов, рис. 3-1 на стр. 20), градуировочная таблица миры и набор диафрагм.

Задание

1. Определение углового диаметра поля зрения телескопа

В фокальной плоскости коллиматора вставить трубку с предметной шкалой. Включить осветитель через трансформатор в сеть. Направив телескоп на объектив коллиматора и вращая накатанное кольцо окуляра, добиться отчетливого видения предметной шкалы. Отрегулировать положение телескопа, так чтобы изображение предметной шкалы располагалось по диаметру поля зрения. Накал лампы осветителя установить наиболее удобным для наблюдения.

Подсчитать число n видимых делений предметной шкалы. Зная цену деления a этой шкалы и фокусное расстояние f коллиматора, вычислить угловой диаметр δ поля зрения по формуле

$$\delta = \frac{na}{f}. \qquad (7.5)$$

(Эта формула следует непосредственно из рассмотрения рис. 7-4 с учетом малости угла δ).

Измерения проделать по три раза для обоих окуляров телескопа, поворачивая каждый раз предметную шкалу на угол порядка 60°.

2. Определение увеличения телескопа

Из формулы (7.2) следует, что определение увеличения телескопа сводится к измерению диаметров входного и выходного зрачков системы (D_1 и D_2). В данном случае диаметр входного зрачка равен диаметру входного отверстия телескопа и может быть измерен непосредственно.

Для измерения диаметра выходного зрачка на окуляр телескопа следует надеть окулярную насадку, снабженную стеклянной пластинкой со шкалой. Перемещением лупы окулярной насадки добиться получения четкого изображения светлого кольца (без параллакса относительно шкалы). Измерить по шкале внешний диаметр кольца. Измерение повторить для обоих окуляров телескопа по три раза, поворачивая каждый раз окулярную насадку на угол порядка 60°.

Зная цену деления шкалы окулярной насадки, вычислить диаметр выходного зрачка D_2 и по формуле (7.2) определить увеличение телескопа для обоих окуляров.

3. Определение разрешающей способности зрительной трубы

Вставить на место предметной шкалы трубку с мирой. Заменить телескоп малой зрительной трубой, сфокусировав ее на отчетливое видение миры. Установить максимальный накал лампы осветителя.

Внимательно рассматривая изображение, найти ту группу квадратов, штрихи которой еще разрешимы (при этом в соседней группе квадратов штрихи должны быть уже не разрешимы). По цифрам соответствующим данному квадрату, найти с помощью градуировочной таблицы миры угловое расстояние $\psi_{пред}$.

Аналогичные измерения провести для всех диафрагм, надевая их поочередно на объектив трубы.

По полученным результатам вычислить значения разрешающей способности A и построить график зависимости A от диаметра действующего отверстия трубы.

Работа 8

ИЗУЧЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ПЛОСКО-ВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЫ

ВВЕДЕНИЕ

Законы геометрической оптики справедливы для идеализированных параксиальных (приосевых) монохроматических световых пучков. В практической оптике используются достаточно широкие пучки и чаще всего не монохроматические, в связи с чем возникают различного рода искажения изображений. Эти искажения носят названия *аберраций*. Рассмотрим некоторые виды аберраций.

а) **Сферическая аберрация.** Этот вид аберрации обусловлен использованием широких пучков лучей. Пусть точечный монохроматический источник света S расположен на главной оптической оси системы. В этом случае параксиальные лучи дадут изображение этого источника в точке P_0 (рис. 8-1); периферийные лучи сойдутся в точке P; промежуточные лучи пересекутся в точке P_i. Таким образом, отступление от параксиальности светового пучка приводит к потере стигматичности (точечности) изображения монохроматического источника S. Этот вид искажения и называется сферической аберрацией.

Благодаря сферической аберрации изображение точки на экране имеет вид неравномерно освещенного кружка рассеяния. Где-то посередине между точками P и P_0 (рис. 8-1) находится кружок рассеяния минимальных размеров, который условно и считается изображением точки.

За меру сферической аберрации $\Delta_{сф}$ оптической системы принимается расстояние между точками P_0 и P, называемое *продольной сферической аберрацией*. При этом $\Delta_{сф}$ считается положительной, если точка P находится справа от точки P_0, и отрицательной, если точка P лежит слева от точки P_0 (рис. 8-1).

Для собирающих линз продольная сферическая аберрация отрицательна, для рассеивающих — положительна. Комбинируя соответствующим образом подобранные положительные и

отрицательные линзы, можно достигнуть значительного уменьшения этого вида аберрации.

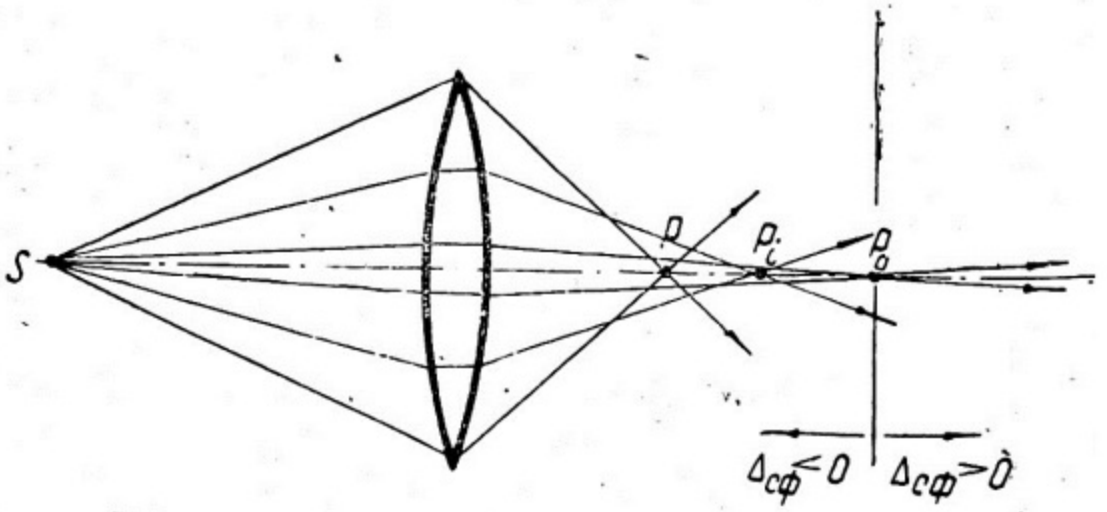

Рис. 8-1

б) **Астигматизм.** Это вид аберрации обусловлен использованием тонких пучков, имеющих значительный наклон к главной оптической оси системы. Пусть точечный источник P (рис. 8-2) посылает монохроматический тонкий наклонный пучок света в направлении некоторой оптической системы $Л$.

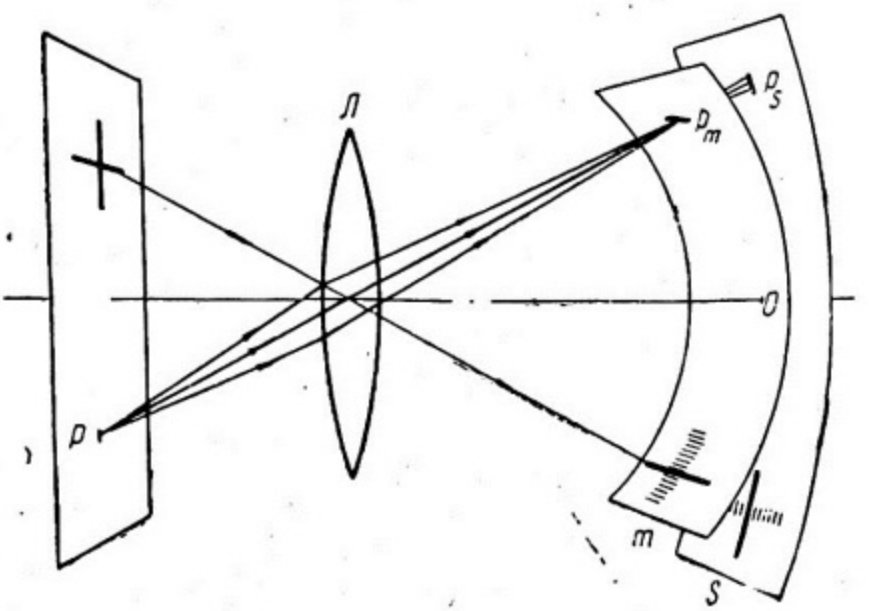

Рис. 8-2

В этом случае вследствие несимметричности расположения источника P относительно оптической системы волновой фронт излучения источника при прохождении через оптическую систему деформируется: его главные радиусы кривизны в общем

случае оказываются различными. В результате точка P будет изображаться двумя взаимно перпендикулярными отрезками P_m и P_s, между которыми находится некоторая область размытия.

Плоскость, проходящую через главную оптическую ось системы и ось пучка, принято называть *меридиональной* плоскостью; лучи, лежащие в этой плоскости, — *меридиональными*, а лучи пучка, расположенные в перпендикулярной плоскости, *сагиттальными*.

Изображения, получаемые в результате пересечения меридиональных лучей, называются меридиональными, а изображения, получаемые при пересечении сагиттальных лучей,—сагиттальными (на рис. 8-2 отрезки P_m и P_s являются соответственно меридиональным и сагиттальным изображениями точки P).

Если в предметной плоскости вместо точки P поместить объект в виде креста, так чтобы одна из его линий лежала в меридиональной плоскости, то изображение креста, как не трудно сообразить, будет иметь вид, показанный на рис. 8-2. Отчетливое изображение горизонтальной линии креста (m) образовано меридиональными лучами, вертикальной линии (s) — сагиттальными лучами.

Из того же рисунка видно, что меридиональное и сагиттальное изображение (m *и* s) лежат в двух искривленных фокальных поверхностях, соприкасающихся в точке O на главной оптической оси системы.

Мерой астигматического искажения, даваемого оптической системой, служит расстояние между изображениями P_m и P_s, называемое *астигматической разностью* $\Delta_{аст}$. Астигматическая разность зависит как от свойств самой оптической системы, так и от угла между осью пучка и главной оптической осью системы.

Для уменьшения астигматизма применяются сложные оптические системы с соответствующим образом подобранными кривизнами поверхностей и показателями преломления линз. Подобного рода оптические системы называются *анастигматами*.

в) **Хроматическая аберрация**. Этот вид аберрации обусловлен зависимостью показателя преломления линз от длины волны света.

Известно, что преломляющие свойства оптической системы (оптическая сила, фокусные расстояния), помимо прочих факторов, зависят от показателей преломления линз. Показатель преломления линз в свою очередь обнаруживает зависимость от длины волны света, различную для разных сортов стекол. Например, обыкновенная линза имеет бóльшую оптическую силу для фиолетовых лучей, чем для красных. В результате, если источник испускает белый свет, его изображение будет размыто и по краям окрашено (рис. 8-3), причем последова-

тельность окрасок изображения зависит от положения экрана $Э$. Между изображениями P_1 и P_0 находится наименее размытое изображение Q, более или менее равномерное по цветовой окраске.

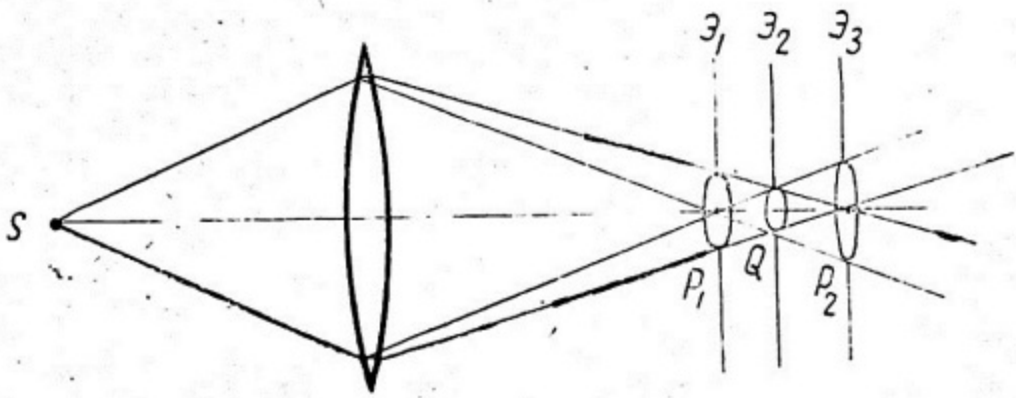

Рис. 8-3

Описанный характер искажения изображения называется хроматической аберрацией. Для количественной оценки ее вводится величина *продольной хроматической аберрации* $\Delta_{хр}$. Она определяется расстоянием между точками P_1 и P_2, которые соответствуют положениям изображения в лучах света с длинами волн λ_1 и λ_2.

Комбинируя линзы с различными показателями преломления, удается исключить хроматическую аберрацию только для каких-либо двух определенных длин волн. Исправленные таким образом оптические системы носят название *ахроматов*.

В заключение следует отметить, что одновременное и полное устранение всех видов аберраций не представляется возможным. Соответствующим подбором систем линз аберрации можно свести лишь к определенному минимуму.

В данной работе исследуется хроматическая и сферическая аберрации фокусов, а также астигматизм и искривление фокальных поверхностей плоско-выпуклой линзы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка, используемая в настоящей работе, схематически изображена на рис. 8-4. Она состоит из осветителя *Осв* (источник света и конденсорная линза), коллиматора *Кол*, в передней фокальной плоскости объектива которого расположено матовое стекло K с черным крестом, исследуемой плоско-выпуклой линзы $Л$ с держателем для диафрагм и матового экрана $Э$ с окулярным устройством *Ок*.

Благодаря коллиматору наблюдаемый объект (крест) как бы удаляется на бесконечность, в результате чего изображение объекта получается в «фокальной плоскости» линзы $Л$.

Изображение проектируют на матовый экран *Э* и рассматривают через окуляр *Ок*.

Линза *Л* может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Угол поворота фиксируется по шкале лимба, расположенного

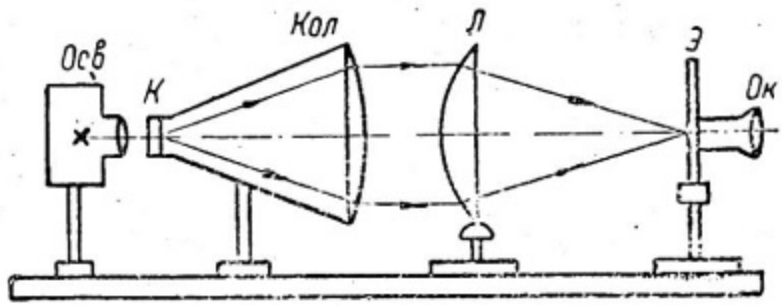

Рис. 8-4

у основания линзы. Отсчет положения экрана *Э* производится по миллиметровой шкале, снабженной нониусом.

Окулярное устройство имеет револьверный диск с набором различных светофильтров. Каждому светофильтру соответствует номер, видимый в специальном окошке над окуляром. Эффективные длины волн света $\lambda_{эф}$, пропускаемого светофильтрами, приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

$\lambda_{эф}$, Å	№ светофильтра
7260	1
6630	9
5740	4
5500	10
5330	5
4780	11
4320	8

К установке прилагается набор диафрагм.

Задание

1. Исследование продольной хроматической аберрации

Включив осветитель установки, вставить в держатель линзы диафрагму с малым круглым отверстием и ввести в ход лучей какой-либо из светофильтров. Перемещением окуляр-

ного устройства как по высоте, так и вдоль оптической скамьи получить изображение центра креста коллиматора в центре поля зрения окуляра. Далее небольшими поворотами линзы добиться одинаковой резкости изображения обеих линий креста. В этом положении линзу закрепить.

Затем в ход лучей ввести светофильтр № 1 и, перемещая экран *Э*, получить в поле зрения окуляра резкое изображение креста. В этом положении сделать отсчет по нониусу окулярного устройства.

Аналогичную установку экрана и измерение проделать не менее трех раз для всех светофильтров, указанных в табл. 8.1. При этом яркость лампы осветителя следует устанавливать каждый раз такой, чтобы яркость поля зрения окуляра была примерно одинаковой для всех светофильтров.

Приняв в качестве исходной точки положение фокуса для света с длиной волны 5500 Å, вычислить продольные хроматические аберрации фокусов для всех светофильтров. Считать условно аберрацию положительной для тех длин волн, фокус которых расположен на бо́льшем расстоянии от исследуемой линзы, чем исходная точка.

По полученным результатам построить график зависимости продольной хроматической аберрации фокусов линзы от длины волны.

2. Исследование продольной сферической аберрации

Ввести в ход лучей светофильтр, при работе с которым (в предыдущем задании) глаз утомляется менее всего и отсчеты имеют наименьший разброс.

Перемещением экрана добиться отчетливого и резкого изображения центральной части креста в поле зрения окуляра (при диафрагме с малым круглым отверстием). По нониусу окулярного устройства взять соответствующий отсчет. Измерение повторить не менее трех раз.

Аналогичные измерения провести для всех кольцевых диафрагм разных диаметров, поочередно вставляя их в держатель линзы.

Приняв в качестве исходной точки положение фокуса при диафрагме с малым круглым отверстием, вычислить продольные сферические аберрации фокусов для всех диафрагм. Построить график зависимости продольной сферической аберрации фокусов от среднего диаметра кольцевой зоны диафрагмы.

3. Исследование астигматизма и характера искривления фокальных поверхностей

В держатель линзы вставить диафрагму с круглым отверстием. Светофильтр оставить тот же, что и в предыдущем задании.

По шкале лимба определить положение исследуемой линзы, при котором изображение горизонтальной и вертикальной линии одинаково отчетливы.

Поворачивая линзу на углы через 4° вправо, последовательно определить положения экрана, при которых отчетливо видны изображения центральных участков отдельно вертикальной и отдельно горизонтальной линий креста. Каждое измерение повторить не менее трех раз.

Аналогичные измерения проделать, поворачивая исследуемую линзу влево на те же углы.

По результатам измерений вычислить значения астигматической разности и построить график ее зависимости от угла поворота исследуемой линзы. Изобразить графически (в масштабе) сечения фокальных поверхностей данной линзы меридиональной плоскостью, полагая фокусное расстояние линзы равным 30 *см*.

Работа 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных условий *наблюдения* интерференции света является *когерентность* складываемых волн, то есть постоянство во времени их разности фаз. Только в этом случае в области перекрытия световых пучков может возникнуть интерференционная картина — система чередующихся светлых и темных полос.

В силу особых свойств излучения независимые источники света оказываются некогерентными, ибо между фазами колебаний атомов этих источников не существует никаких постоянных соотношений. Однако можно осуществить различные схемы опытов, в которых *искусственно* создаются когерентные источники света путем расчленения света от *одного* источника, например, на два пучка, и последующего соединения этих пучков в определенной области пространства.

Один из таких опытов осуществляется с помощью так называемой *бипризмы Френеля*. Бипризма представляет собой симметричную стеклянную призму (*Б*, рис. 9-1) с очень малыми преломляющими углами α.

На рис. 9.1 изображена схема данного опыта. Источником света служит узкая освещаемая щель *С*, параллельная ребру тупого угла бипризмы. При прохождении света через верхнюю и нижнюю половины бипризмы каждая элементарная световая волна расчленяется на две когерентных волны, как-бы исходящие из двух точек C_1 и C_2, являющихся мнимыми изображениями источника C*. Расчлененные пучки частично перекры-

* При малом значении преломляющего угла α бипризмы мнимые источники C_1 и C_2 практически будут находиться на том же расстоянии от бипризмы, что и источник *С*.

ваются, образуя *зону интерференции*. На экране Э наблюдается система чередующихся светлых и темных полос, параллельных щели *С*.

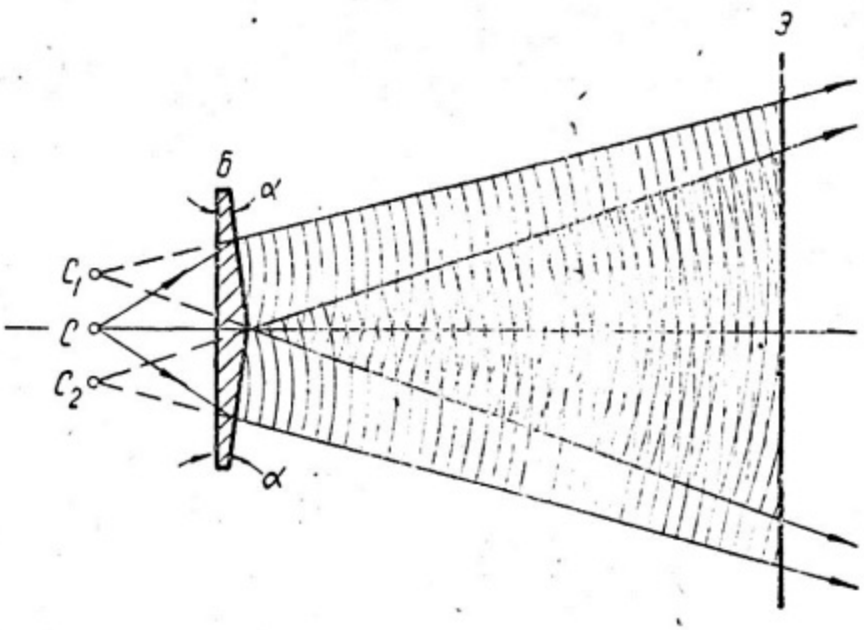

Рис. 9-1

Для расчета интерференционной картины, получающейся на экране, проще всего воспользоваться лучевой схемой данного опыта (рис. 9-2). Так как колебания источников C_1 и C_2

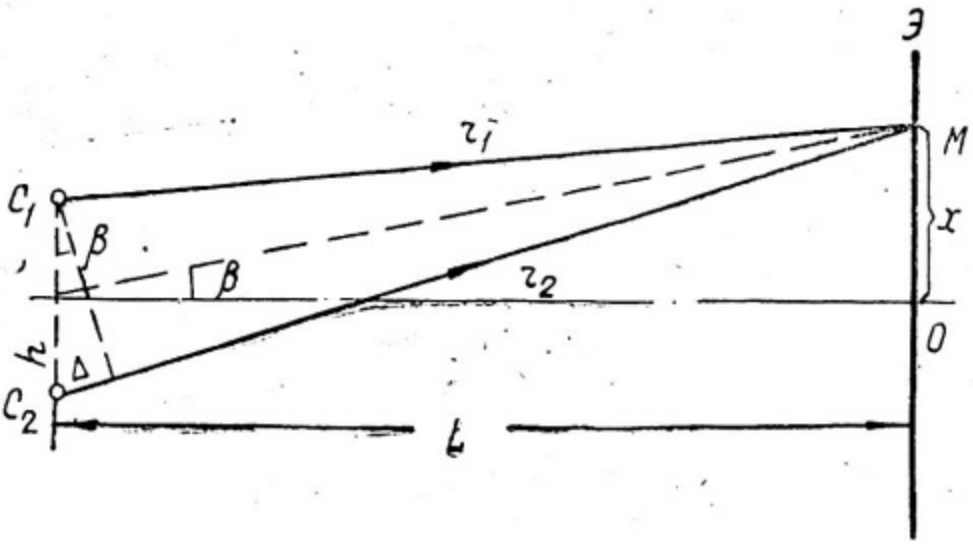

Рис. 9-2

происходят в одной фазе (синфазны), то результат интерференции в произвольной точке *M* экрана будет зависеть только от разности хода Δ лучей r_1 и r_2 ($\Delta = r_2 - r_1$). В тех точках

экрана, для которого Δ равно целому числу длин волн λ (колебания от обоих источников приходят в фазе), имеют место максимумы освещенности; в тех же точках, для которых Δ равно нечетному числу полуволн $\lambda/2$ (колебания приходят в противофазе), — минимумы освещенности.

Из рис. 9-2 непосредственно следует, что расстояние x между центральным максимумом (в точке O) и максимумом k-го порядка ($\Delta = k\lambda$) с учетом малости угла β равно

$$x = L\beta = k\lambda \frac{L}{h}, \tag{9.1}$$

где L — расстояние от мнимых источников C_1 и C_2 до экрана, h — расстояние между этими источниками.

Отсюда ширина интерференционной полосы Δx, то есть расстояние между соседними максимумами (или минимумами), равна

$$\Delta x = \lambda \frac{L}{h}. \tag{9.2}$$

Можно показать, что расстояние между мнимыми источниками для бипризмы

$$h \approx 2al(n-1), \tag{9.3}$$

где l — расстояние между щелью C и бипризмой, a — преломляющий угол бипризмы, n — ее показатель преломления. Формулы (9.2) и (9.3) описывают характер зависимости ширины интерференционной полосы от величин L, l, a, n и объясняют, в частности, почему преломляющий угол a бипризм делается как можно меньше.

Формула (9.2) позволяет определить длину световой волны. Ширина полосы Δx измеряется непосредственно, для определения же величины отношения L/h можно поступить следующим образом. Между бипризмой и экраном помещают линзу $Л$ (рис. 9-3) с известным фокусным расстоянием f. При определенном положении данной линзы на экране получаются изображения C_1' и C_2' мнимых источников C_1 и C_2. В этом случае, как видно из рис. 9-3 $h/h' = s/s'$ и $L = s + s'$. Используя, кроме того, формулу тонкой линзы, найдем, что $L/h = s'^2/h'f$. В результате расчетная формула для определения длины световой волны будет иметь следующий вид:

$$\lambda = \frac{fh'}{s'^2}\Delta x, \tag{9.4}$$

где h' — расстояние между изображениями источников на экране, s' — расстояние от линзы до экрана.

Выше предполагалось, что источник света C монохроматический и имеет вид бесконечно узкой щели. Рассмотрим, как

влияет на интерференционную картину несоблюдение этих условий.

Конечность ширины щели источника приводит к уменьшению резкости интерференционной картины вследствие эффекта перекрытия элементарных интерференционных картин, ко-

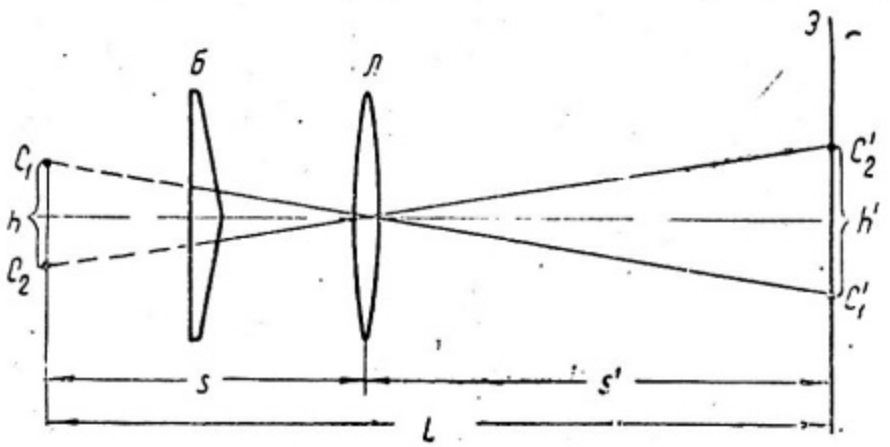

Рис. 9-3

торые возникают от разных элементов щели. Интерференционная картина считается еще резкой, если ширина щели источника настолько мала, что сдвиг элементарных интерференционных картин от крайних точек щели источника не превышает четверти ширины интерференционной полосы. Последнее имеет место, когда ширина щели источника $b \leqslant \frac{\lambda L}{2h}$.

В случае немонохроматичности источника наблюдаемая интерференционная картина представляет собой результат наложения систем интерференционных полос, соответствующих различным длинам волн λ. Так как ширина полос пропорциональна λ, то при наличии спектрального интервала $\Delta\lambda$ максимумы одних длин волн будут накладываться на минимумы других длин волн, и по мере удаления от центрального максимума интерференционные полосы будут постепенно размываться и исчезать. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше спектральный интервал $\Delta\lambda$. Зависимость между шириной спектрального интервала $\Delta\lambda$ и номером полосы k, начиная с которой интерференционная картина исчезает совсем, оказывается следующей:

$$\Delta\lambda = \gamma \frac{\lambda}{k}, \qquad (9.5)$$

где γ — постоянная, зависящая от ширины щели, λ — некоторая средняя длина волны данного спектрального интервала.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе используется установка, называемая *оптической скамьей*. Она состоит из массивной направляющей, на которую помещаются специальные штативы (рейтеры) с необходимыми оптическими элементами (рис. 9-4): осветитель *Осв* (источник света с конденсорной линзой), диафрагма *С* с раз-

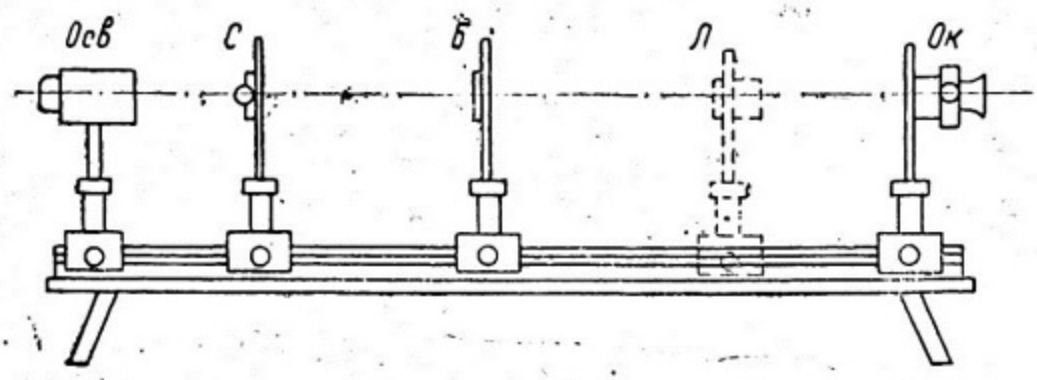

Рис. 9-4

движной щелью и держателем для светофильтров, бипризма *Б* и окулярное устройство *Ок*, снабженное измерительной шкалой и микрометром. Цена деления барабана микрометра 0,01 *мм*.

Вспомогательная линза *Л* служит для получения изображений мнимых источников света в фокальной плоскости окуляра *Ок*. Фокусное расстояние линзы указано на ее оправе.

К установке прилагаются два светофильтра, служащих для выделения света в достаточно узких спектральных интервалах. Спектральный интервал одного из светофильтров указан на самом светофильтре.

Задание

1. Наладка установки

Закрепить осветитель на конце оптической скамьи. Сняв бипризму и вспомогательную линзу, включить осветитель и расположить диафрагму со щелью так, чтобы освещение щели было наиболее ярким и равномерным. Пододвинуть окулярный микрометр к щели, и установить центр отверстия окуляра на одной высоте с серединой щели. Затем окулярный микрометр отодвинуть на конец оптической скамьи, противоположный осветителю.

Увеличив ширину щели диафрагмы, проверить с помощью листа белой бумаги, концентрично ли световое пятно отверстию окулярного микрометра и равномерно ли оно освещено. (Если

этого не наблюдается, то наладку освещения щели следует повторить снова).

После этого уменьшить ширину щели и на расстоянии 30—40 *см* от нее поместить на оптическую скамью бипризму. Слегка поворачивая оправу бипризмы вокруг оптической оси системы, добиться того, чтобы ребро бипризмы стало параллельным щели. При правильной установке бипризмы экран окулярного микрометра пересечется светлой полосой, которая будет проходить приблизительно через центр его отверстия, а в поле зрения окуляра будут видны окрашенные интерференционные полосы. Если интерференционные полосы не резки, следует попробовать уменьшить ширину щели. Если и при этом резкость картины не увеличится, то это значит, что ребро бипризмы непараллельно щели. В этом случае, не прекращая наблюдения, нужно слегка повернуть оправу с бипризмой, выправляя ее положение.

2. Определение длины световой волны

Установив в держателе диафрагмы один из светофильтров, измерить с помощью окулярного микрометра расстояние между серединами темных (или светлых) полос, отстоящих друг от друга на 5—7 полос. Вычислить отсюда ширину одной полосы Δx.

Аналогичные измерения провести не менее трех раз для обоих светофильтров. Одновременно подсчитать полное число видимых интерференционных полос для каждого светофильтра. Так как полосы исчезают постепенно, то полное число их определяется с некоторой долей неуверенности, вследствие чего подсчет следует произвести несколько раз.

После этого поместить между бипризмой и окулярным микрометром вспомогательную линзу и, *не меняя расстояния между щелью и бипризмой,* найти такое положение этой линзы, при котором в поле зрения окулярного микрометра получится *увеличенное* резкое двойное изображение щели. Добившись отсутствия параллакса между изображениями щели и окулярной шкалой, измерить с помощью окулярного микрометра расстояние h' между серединами этих изображений. Затем измерить расстояние s' между центром вспомогательной линзы и положением шкалы окулярного микрометра.

Повторив измерения h' и s' не менее трех раз, вычислить по формуле (9.4) значения длин волн для обоих светофильтров.

3. Определение области пропускания $\Delta\lambda$ светофильтра

Из формулы (9.5) следует, что отношение спектральных интервалов двух светофильтров равно

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2} = \frac{\lambda_1 k_2}{\lambda_2 k_1}.$$

Отсюда, зная величину спектрального интервала одного из светофильтров и полагая под k_1 и k_2 полное число видимых интерференционных полос соответствующих светофильтров, вычислить величину спектрального интервала (область пропускания) другого светофильтра.

Работа 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение интерференции света, как известно, возможно лишь в том случае, если интерферирующие световые волны *когерентны*, то есть имеют постоянную во времени разность фаз. Во всех интерференционных схемах получение когерентных световых волн достигается путем искусственного расчленения световых волн, исходящих из *одного* источника, на две (или более) части. Последние, будучи когерентными волнами, в области перекрытия дают устойчивую интерференционную картину, представляющую собой совокупность чередующихся светлых и темных полос.

Один из способов наблюдения интерференции света осуществляется при отражении падающего света от верхней и нижней границ тонкой воздушной прослойки, образованной

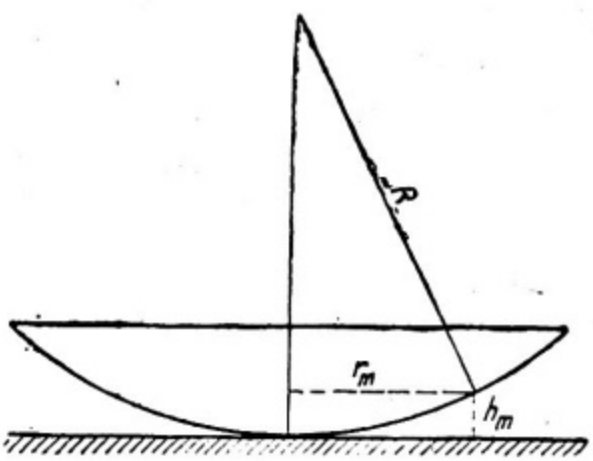

Рис. 10-1

между поверхностью плоской хорошо отполированной пластинки и соприкасающейся с ней выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны (рис. 10-1). Отраженные от

обеих поверхностей воздушной прослойки световые волны являются когерентными и поэтому будут интерферировать, образуя полосы, носящие название *колец Ньютона*. В месте соприкосновения обеих поверхностей будет наблюдаться темное пятно, окруженное системой чередующихся светлых и темных концентрических колец, постепенно убывающей ширины. Каждое интерференционное кольцо проходит через точки, соответствующие одной и той же толщине воздушной прослойки (случай интерференционных *полос равной толщины*).

Темные кольца в отраженном свете (при нормальном падении монохроматического света на систему) возникают в тех местах, где оптическая разность хода лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, составляет нечетное число полуволн $\lambda/2$. Для m-го темного кольца указанная оптическая разность хода равна $2h_m + \frac{\lambda}{2}$, где h_m — толщина воздушной прослойки в месте расположения данного кольца (рис. 10-1), а $\lambda/2$ — дополнительная разность хода, которая возникает в связи с тем, что одна из интерферирующих волн отражается от оптически более плотной среды, испытывая при этом скачок фазы на π («потеря полуволны»).

Таким образом, условие образования m-го темного кольца приобретает следующий вид:

$$2h_m + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (10.1)$$

Толщину воздушной прослойки h_m можно легко выразить через радиус m-го темного кольца r_m и радиус кривизны поверхности линзы R, пользуясь простыми геометрическими соображениями (рис. 10-1). Учитывая при этом малость кривизны поверхности линзы, находим:

$$h_m = \frac{r_m^2}{2R}. \qquad (10.2)$$

Комбинируя (10.1) и (10.2), получаем

$$r_m^2 = m\lambda R. \qquad (10.3)$$

Отсюда, измерив r_m и зная m и R, можно определить длину световой волны λ.

Однако, практически трудно добиться идеального контракта сферической линзы и плоской пластинки в одной точке вследствие упругой деформации стекла и попадания в место соприкосновения мельчайших пылинок. Поэтому непосредственно использовать формулу (10.3) для вычислений нельзя: m-му темному кольцу в действительности может соответствовать не m-ый порядок интерференции, а $m + p$, где p — целое число, одинаковое для всех колец.

Поэтому для исключения возможной шибки вычисление λ производят по *разности* квадратов радиусов двух колец r_m и r_n, тогда расчетная формула будет иметь следующий вид:

$$\lambda = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m-n)R} = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{(m-n)R}. \qquad (10.4)$$

В заключение необходимо отметить, что с уменьшением степени монохроматичности используемого в данном опыте света, число наблюдаемых колец также уменьшается. Это явление обусловлено эффектом перекрывания максимумов различных длин волн, содержащихся в используемом свете, что приводит к постепенному исчезновению колец по мере удаления от центра интерференционной картины.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ

В данной работе используются два прибора: сферометр — для определения радиуса кривизны поверхности линзы и инструментальный микроскоп — для измерения радиусов колец Ньютона.

Сферометр. Принцип действия сферометра показан на рис. 10-2. Линза, радиус сферической поверхности которой нужно измерить, кладется на сферические опоры *1* радиуса ρ,

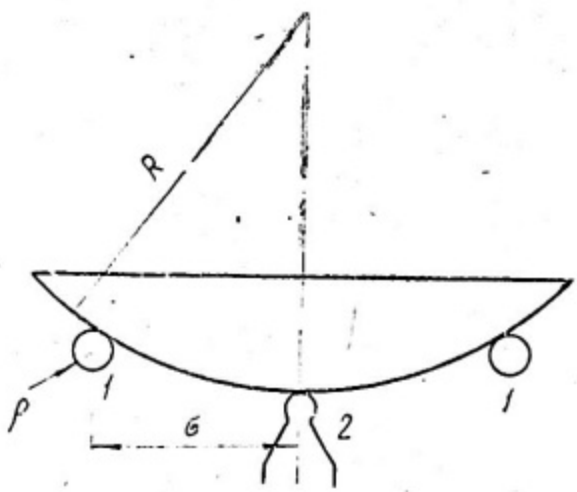

Рис. 10-2

расположенные на измерительном кольце радиуса σ. При помощи измерительного наконечника *2*, соединенного с отсчетной шкалой, производится измерение стрелы прогиба сферы d. Можно показать, что радиус сферы малой кривизны с достаточной точностью вычисляется по формуле

$$R = \frac{\sigma^2}{2d} - \rho. \qquad (10.5)$$

Значения ρ и σ указаны на приборе.

Внешний вид сферометра представлен на рис. 10-3.

В верхней части корпуса *1* имеется измерительное кольцо *3* с тремя опорными шариками, на которые помещается измеряе-

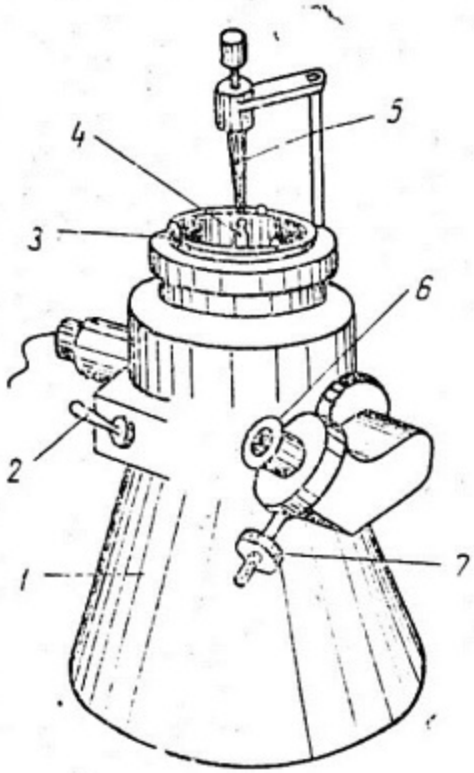

Рис. 10-3

мая линза. Внутри корпуса расположен измерительный стержень *4*, который под действием специального груза поднимается вверх до соприкосновения с поверхностью линзы. Если вес линзы недостаточен, чтобы преодолеть давление со стороны измерительного стержня, то применяется упор *5*, которым линза прижимается к измерительному кольцу. Для отвода измерительного стержня вниз служит рычаг-арретир *2*.

Измерительный стержень соединен с миллиметровой шкалой, отсчет по которой производится через окуляр *6*. В поле зрения окуляра одновременно видны (рис. 10-4): два-три штриха миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами (на рисунке: 11, 12 и 13), неподвижная вертикальная шкала 0, 1, 2, . . . , 10) с ценой деления 0,1 *мм* и круговая шкала вверху с ценой деления 0,001 *мм*. Кроме того, в поле зрения имеется десять двойных витков спирали (спиральный нониус).

Чтобы произвести отсчет, необходимо маховичком *7* (рис. 10-3) подвести двойной виток спирали так, чтобы миллиметровый штрих, находящийся в зоне витков спирали, оказался точно по середине между двойными линиями витка. Отсчет

берется следующим образом (см. рис. 10-4): число миллиметров — 12, десятых долей миллиметра — 2 (по числу целых де-

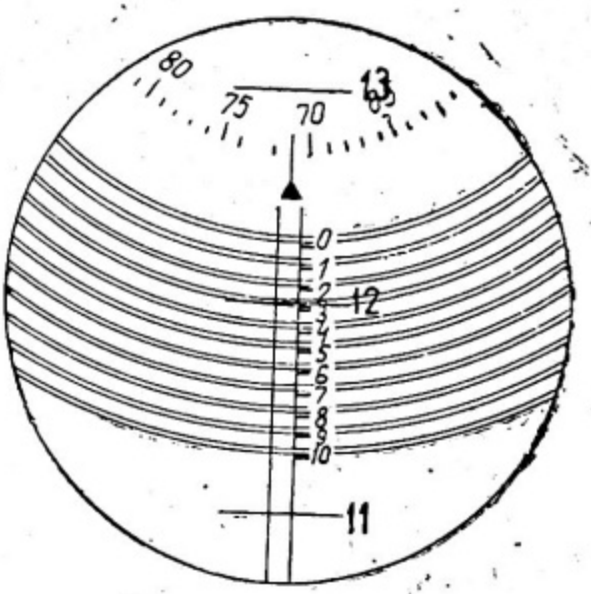

Рис. 10-4

лений неподвижной вертикальной шкалы над штрихом 12), тысячных долей миллиметра — 71 (по делению верхней круговой шкалы, находящемуся под указателем стрелки). Окончательный отсчет в данном случае будет 12,271 *мм*.

Инструментальный микроскоп. Оптическая схема микроскопа представлена на рис. 10-5. Исследуемая линза *3* помещается на подвижном столике *2* прибора. Перемещение столика производится в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью микрометрических винтов *1* с отсчетными барабанами. Цена деления барабана 0,01 *мм*. Тубус микроскопа снабжен отсчетным крестом, находящимся в поле зрения окуляра *8*.

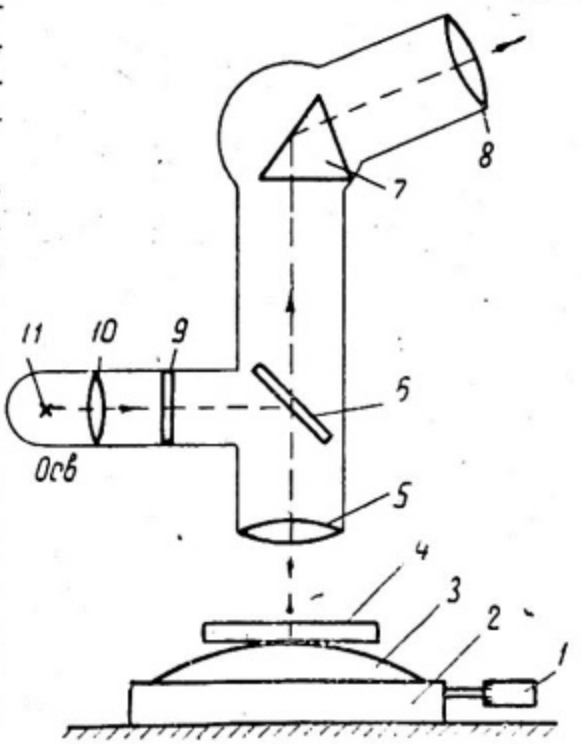

Рис. 10-5

Освещение поверхности линзы осуществляется специальным осветителем *Осв*, укрепленным на тубусе микроскопа.

Свет от источника *11*, пройдя конденсор *10*, светофильтр *9* и отразившись от поверхности полупрозрачного зеркала *6*, попадает через объектив микроскопа *5* на пластинку *4* и поверхность исследуемой линзы *3*.

Интерференционные кольца, наблюдаемые через окуляр *8*, располагаются непосредственно на поверхности воздушного зазора между стеклянной пластинкой и исследуемой линзой.

Задание

1. Измерение радиуса кривизны линзы

Опустив рычагом *2* (рис. 10-3) измерительный стержень сферометра, осторожно положить на кольцо *3* плоскую стеклянную пластинку, прилагаемую к прибору. Отпустить рычаг *2*, после чего измерительный стержень, плавно поднимаясь, придет в соприкосновение с пластинкой. Через окуляр взять соответствующий отсчет по спиральному нониусу. Измерение повторить не менее трех раз, перемещая пластинку по кольцу.

Аналогичные измерения произвести для линзы, поставив ее на место пластинки. Из разностей отсчетов для пластинки и линзы найти величину стрелы прогиба d и по формуле (10.5) вычислить радиус кривизны R поверхности линзы.

2. Измерение радиусов колец Ньютона и определение длины волны

Проверить настройку микроскопа: положив на столик микроскопа листок белой бумаги, включить осветитель и убедиться в том, что световое пятно имеет круглую форму и равномерную освещенность. При перемещении тубуса микроскопа вверх или вниз пятно не должно ни смещаться в сторону, ни значительно изменять свои размеры (в противном случае обратиться к лаборанту).

Убрав затем лист белой бумаги, поднять тубус вверх и положить на столик микроскопа исследуемую линзу. Вращением микрометрических барабанов, перемещающих столик, установить их на серединах соответствующих шкал. Обмахнуть поверхности линзы и стеклянной пластинки специальной кисточкой от пыли и осторожно без скольжения наложить стеклянную пластинку на поверхность линзы. В месте контакта линзы и пластинки должна появиться видимая на-глаз интерференционная картина.

Опустить после этого тубус микроскопа почти до соприкосновения с поверхностью пластинки, а линзу передвинуть на столике в такое положение, при котором центр интерференционной картины оказался бы приблизительно в середине светового пучка.

Сфокусировать окуляр микроскопа вращением накатанного кольца на отчетливое видение в его поле зрения отсчетного креста нитей. Затем, медленно поднимая тубус, добиться появления в поле зрения окуляра интерференционных колец (без параллакса относительно креста). Дополнительным перемещением линзы по столику совместить центр системы интерференционных колец с центром окулярного креста.

Далее, перемещая столик микроскопа с помощью одного из микрометрических барабанов, последовательно совместить с центром окулярного креста середины темных интерференционных колец (начиная с 3-го или 4-го от центра). Соответствующие отсчеты по барабану микрометра записать в таблицу (вместе с порядковым номером кольца).

Пройдя последовательно все видимые кольца по одну сторону от центра, повторить те же измерения в обратном порядке. Затем перейти через середину интерференционной картины и таким же образом промерить положение темных колец по другую сторону.

Аналогичные измерения проделать в перпендикулярном направлении с помощью второго микрометрического барабана.

Из разности соответствующих отсчетов найти средние значения радиусов всех темных колец.

Комбинируя попарно радиусы колец с разными номерами, вычислить по формуле (10.4) не менее семи значений λ. При этом в целях повышения точности рекомендуется комбинировать радиусы тех колец, номера которых отличаются друг от друга на половину полного числа видимых колец.

Из полученных значений определить среднее значение длины световой волны и ее погрешность.

Работа 11

ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных условий *наблюдения* интерференции света является, как известно, *когерентность* интерферирующих волн, то есть постоянство во времени их разности фаз. Получение когерентных световых волн во всех интерференционных схемах достигается путем искусственного расчленения первичного светового потока, исходящего от *одного* источника, например, на две части. В результате в области перекрытия полученных световых потоков возникает устойчивая картина интерференции, легко доступная для наблюдения.

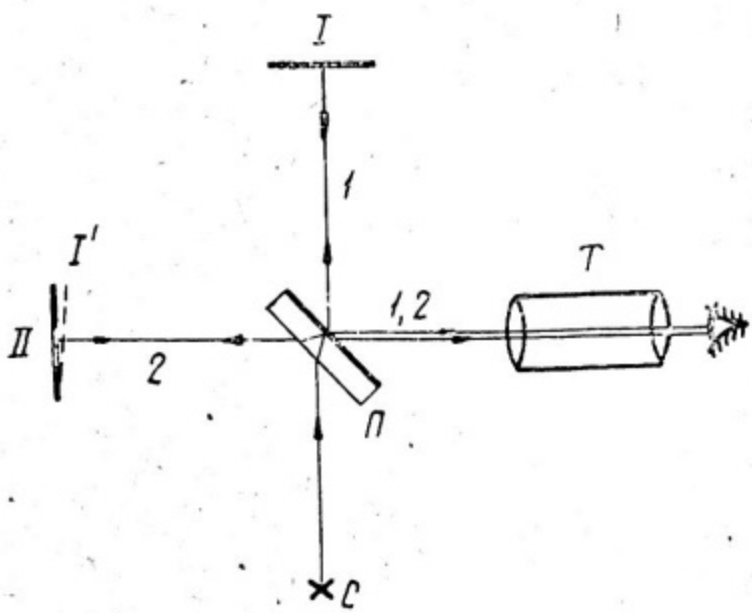

Рис. 11-1

Рассмотрим более подробно принцип действия интерференционной схемы (рис. 11.1), используемый в приборе настоящей работы (схема Майкельсона). Расчленение светового пучка,

идущего от источника C, достигается здесь с помощью стеклянной пластинки $П$, на задней поверхности которой нанесен тонкий полупрозрачный слой серебра. Получающиеся когерентные пучки света (преломленный *1* и отраженный *2*) после отражения от зеркал *I* и *II* вновь соединяются пластинкой $П$ и интерферируют. Интерференционную картину наблюдают через зрительную трубу T.

В зависимости от относительного положения зеркал *I* и *II*, а также от способа их освещения в схеме Майкельсона возникают или интерференционные полосы *равной толщины*, или интерференционные кольца *равного наклона*.

В данной работе реализуется первый случай — интерференционные полосы равной толщины. Причина возникновения этих полос заключается в следующем. Представим себе, что зрительная труба T сфокусирована на поверхность зеркала *II*. Тогда при условии приблизительного равенства оптических путей, проходимых лучами *1* и *2* от точки расчленения до точки соединения их, глаз наблюдателя будет видеть одновременно оба зеркала: зеркало *II* непосредственно и изображение зеркала *I* в полупрозрачной пластинке (I'), показанное на рис. 11-1 пунктиром. Если зеркало *I* расположено так, что его изображение I' образует с зеркалом *II* мнимый воздушный клин, то такое расположение по своему действию эквивалентно интерференции от аналогичного действительного клина.

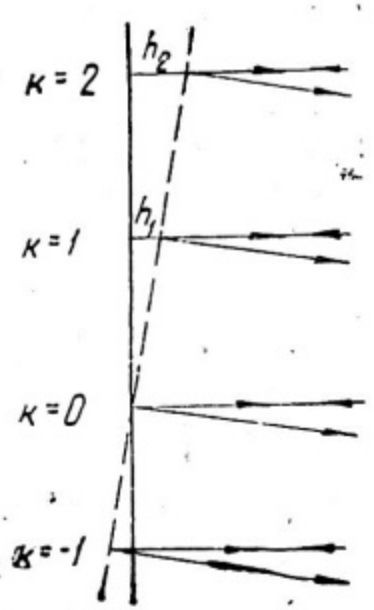

Рис. 11-2

Известно, что при освещении тонкого оптического клина параллельным пучком света интерференционная картина имеет вид чередующихся светлых и темных полос, параллельных ребру клина и локализованных на его поверхности. Светлые полосы возникают в тех местах клина (рис. 11-2), где оптическая разность хода интерферирующих лучей равна целому числу световых длин волн. При малых углах падения, как видно из рис. 11-2, оптическая разность хода равна удвоенной толщине клина $2h_k$, поэтому в тех местах клина, где возникают интерференционные максимумы, должно выполняться условие

$$2h_k = k\lambda. \qquad (11.1)$$

Здесь h_k — толщина клина в месте положения k-го максимума, k — порядок интерференционного максимума ($k = 0, 1, 2, \ldots$).

Из рис. 11-2 не трудно сообразить, что ширина интерференционных полос тем больше, чем меньше угол между поверхностями клина и чем больше длина световой волны.

В случае немонохроматического света интерференционные полосы по мере удаления от центрального максимума размываются и постепенно исчезают вследствие эффекта наложения максимумов одних длин волн на минимумы других длин волн. Именно поэтому использование немонохроматического света позволяет получить интерференционную картину лишь в тех местах мнимого клина, где оптическая разность хода интерферирующих лучей не велика, то есть соответствует невысоким порядкам интерференции.

Вид интерференционных полос зависит от характера поверхностей зеркал *I* и *II*, или другими словами, от характера поверхностей мнимого клина. Если обе поверхности клина плоские, то полосы прямолинейны и параллельны ребру клина. Если одна из поверхностей имеет какие-либо неровности (царапины, выступы, углубления), то интерференционные полосы, располагаясь по равной толщине клина, искривляются на определенную величину в ту или другую сторону. Например, если на нижней поверхности клина имеется царапина в виде треугольной канавки, перпендикулярной ребру клина, то полосы интерференции над царапиной будут искривлены в сторону ребра клина, как показано на рис. 11-3.

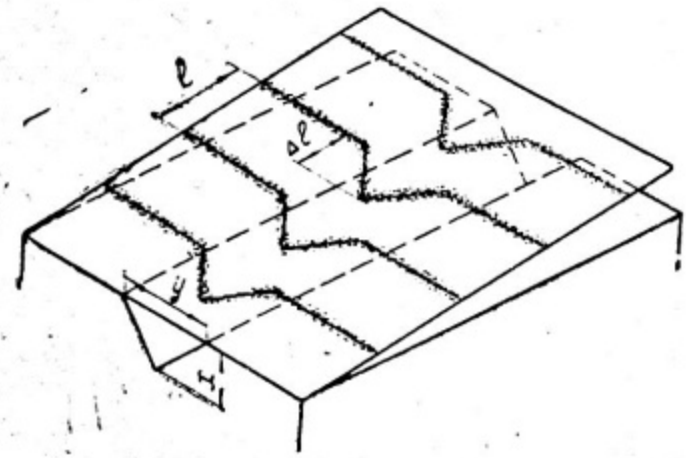

Рис. 11-3

По степени искривления интерференционных полос можно легко определить глубину царапины. В самом деле, так как переход от одной полосы к соседней соответствует изменению

толщины клина согласно формуле (11.1) на $\lambda/2$, то глубина царапины

$$x = \eta \frac{\lambda}{2}, \qquad (11.2)$$

где η — смещение полосы, измеренное в долях ширины полосы ($\eta = \Delta l/l$, см. рис. 11.3).

ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ

В данной работе используется интерференционный микроскоп МИИ-5, предназначенный для визуальных измерений микронеровностей металлических поверхностей. Прибор позволяет измерять неровности от 0,05 до 1 *мк*.

Оптическая схема прибора представлена на рис. 11-4. Свет от лампочки накаливания *1* проходит через конденсор *2* и осве-

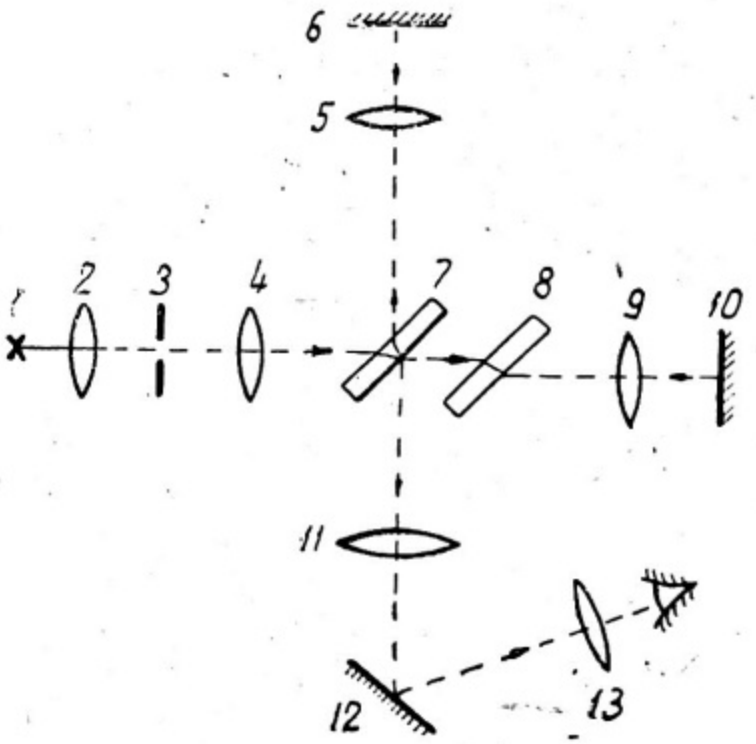

Рис. 11-4

щает отверстие диафрагмы *3*. Коллиматорный объектив *4* дает параллельный пучок лучей, падающих на пластинку *7*. Нижняя поверхность этой пластины покрыта полупрозрачным слоем серебра, вследствие чего она часть первичного пучка отражает-

ся вверх, другая—проходит дальше в направлении зеркала *10*. Первый пучок, пройдя объектив *5*, отражается затем от поверхности исследуемого образца *6*, расположенной в фокальной плоскости этого объектива, проходит через пластинку *7* и собирается в фокальной плоскости объектива *11*. Зеркало *12* позволяет наблюдать изображение поверхности *6* через окуляр *13*.

Второй пучок, пройдя через компенсационную пластинку *8** и объектив *9*, отражается от поверхности металлического зеркала *10*, расположенной в фокальной плоскости объектива *9*, проходит затем опять через объектив *9*, пластину *8* и, отражаясь от нижней поверхности пластинки *7*, собирается также в фокальной плоскости объектива *11*.

В отсутствии исследуемого образца *6* в поле зрения окуляра должна быть видна поверхность зеркала *10*. Однако увидеть эту поверхность очень трудно ввиду ее большой чистоты, можно только обнаружить случайно осевшие на ней пылинки.

При наличии исследуемого образца его поверхность и изображение поверхности зеркала *10* образуют мнимый клин, который и дает интерференционные полосы равной толщины. Ребру мнимого клина в белом свете будет соответствовать белая ахроматическая полоса. Так как поверхность зеркала *10* идеально гладкая, то искривления интерференционных полос будут происходить исключительно из-за наличия микронеровностей на поверхности *6*.

Внешний вид прибора представлен на рис. 11-5. В патрубке *1* находится осветитель. Исследуемые объекты помещаются на отверстие в центре предметного столика *2*, который можно поворачивать вокруг вертикальной оси. В патрубке *3* расположено боковое зеркало. Положение этого зеркала в процессе настройки прибора регулируется вращением установочного винта *5* (после раскрепления контргайки *4*). Боковое зеркало можно открыть или закрыть поворотом рукоятки *6*, связанной с заслонкой. На торце рукоятки выгравирована стрелка: при горизонтальном положении стрелки боковое зеркало открыто, при вертикальном — закрыто. Винтом *7* производится фокусировка изображения, наблюдаемого через окулярный микрометр *8*.

К прибору прилагаются: исследуемый образец, насадка с красным светофильтром ($\lambda = 0{,}63$ *мк*) и объект-микрометр (прозрачная шкала в 1 *мм* с ценой деления 0,01 *мм*).

---

* Пластинка *8* служит для наблюдения интерференции в *белом* свете, преимуществом которого является наличие белой ахроматической полосы, легко отличимой от остальных окрашенных полос. Для получения белой полосы необходимо, оказывается, чтобы оба интерферирующих пучка проходили одинаковый путь не только в воздухе, но и в стекле, что и достигается введением компенсационной пластинки, идентичной пластинке *7*.

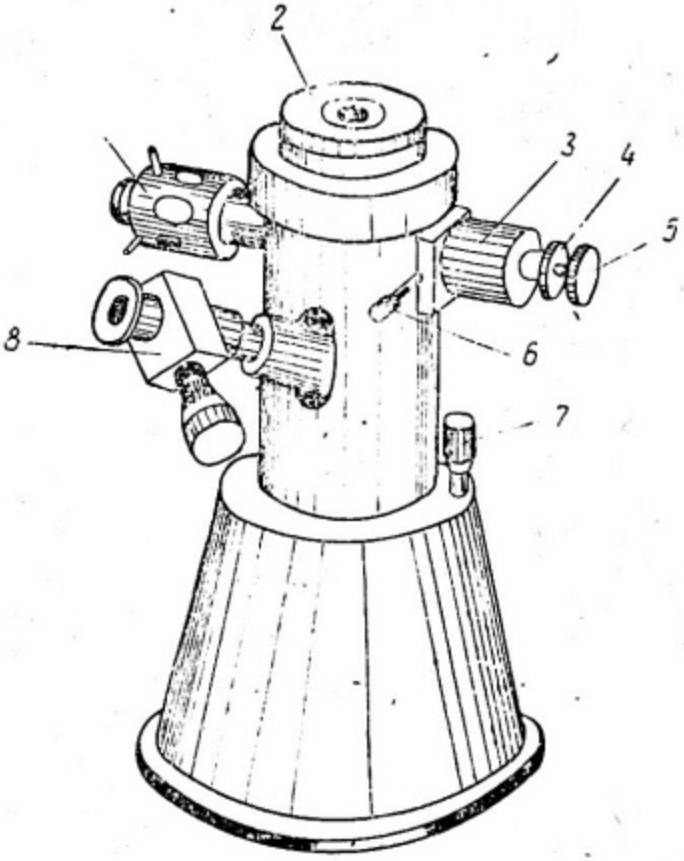

Рис. 11-5

Задание

1. Настройка прибора

Включить осветитель прибора на пониженном накале. Повернуть рукоятку заслонки *6* (рис. 11-5) стрелкой вверх, закрыв тем самым боковое зеркало. На предметный столик прибора поместить образец с исследуемой поверхностью.

Медленно вращая винт *7*, добиться получения в поле зрения окуляра микроскопа отчетливого изображения поверхности данного образца. Повернуть рукоятку *6* стрелкой горизонтально, в результате чего в поле зрения окуляра должна возникнуть интерференционная картина. Небольшим поворотом винта *7* ввести полученную систему интерференционных полос на середину поля зрения.

Если интерференционная картина не видна, то с ведома преподавателя произвести регулировку положения бокового зеркала: раскрепить контргайку *4* и осторожным поворотом винтов *5* и *7* добиться появления интерференционной картины и отчетливого изображения исследуемой поверхности. После этого контргайку вновь закрепить.

2. Измерение глубины царапины

Перемещением образца на предметном столике найти участок поверхности с наиболее подходящей царапиной, расположив ее в середине поля зрения перпендикулярно интерференционным полосам. Винтом *5* установить ширину полос, наиболее удобную для измерений.

Затем окулярный микрометр повернуть вокруг оптической оси в такое положение, чтобы одна из нитей креста была параллельной интерференционным полосам. При этом шкала и двойной штрих в поле зрения окуляра примут косое положение. На окуляр микрометра надеть насадку с красным светофильтром.

После этого произвести измерение ширины интерференционной полосы. Для этого вращением барабана окулярного микрометра совместить нить креста с одной из крайних интерференционных полос и произвести отсчет a_1 (целых делений окулярной шкалы по положению двойного штриха, десятых и сотых долей шкалы по барабану окулярного микрометра). Далее вращением барабана совместить нить креста с интерференционной полосой на другом краю поля зрения, взяв соответствующий отсчет a_2 по шкале и барабану окулярного микрометра. Разделив разность полученных отсчетов $(a_1 - a_2)$ на число интерференционных полос n между измеренными полосами, найти ширину одной интерференционной полосы l.

Повторив измерения не менее трех раз, вычислить из полученных результатов среднее.

Затем измерить величину искривления интерференционных полос Δl (рис. 11-3) — не менее семи раз, и взять среднее из полученных значений.

По формуле (11.2) вычислить глубину царапины. Полученную интерференционную картину зарисовать.

3. Измерение ширины царапины

Повернуть окулярный микрометр на 90° и измерить по его шкале и барабану ширину y (рис. 11-3) искривленной части интерференционной полосы, которая, очевидно, должна совпадать с шириной самой царапины.

Для определения истинной ширины царапины необходимо найти цену деления шкалы барабана окулярного микрометра. Для этого следует заменить исследуемый образец объект-микрометром, расположив шкалу последнего перпендикулярно одной из нитей креста, и определить отношение длины произвольно выбранного интервала шкалы объект-микрометра (в *мм*) к разности соответствующих отсчетов по барабану окулярного микрометра.

После этого не трудно вычислить и истинную ширину царапины.

По полученным результатам изобразить в масштабе профиль царапины с указанием размеров глубины и ширины ее.

Работа 12

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА

ВВЕДЕНИЕ

Основным условием *наблюдения* интерференции света является *когерентность* интерферирующих волн, то есть сохранение постоянной во времени их разности фаз. В силу особых свойств излучения использование независимых источников света не позволяет получить картины интерференции, ибо между фазами элементарных волн, испускаемых атомами таких источников, нет никаких постоянных соотношений.

Однако, можно осуществить схемы опытов, в которых *искусственно* создаются когерентные источники света путем расчленения светового пучка от *одного* источника на две части с последующей встречей их в месте интерференции.

Один из способов, основанных на таком принципе, применен в интерферометре, принципиальная оптическая схема которого представлена на рис. 12-1. От источника света S (ярко

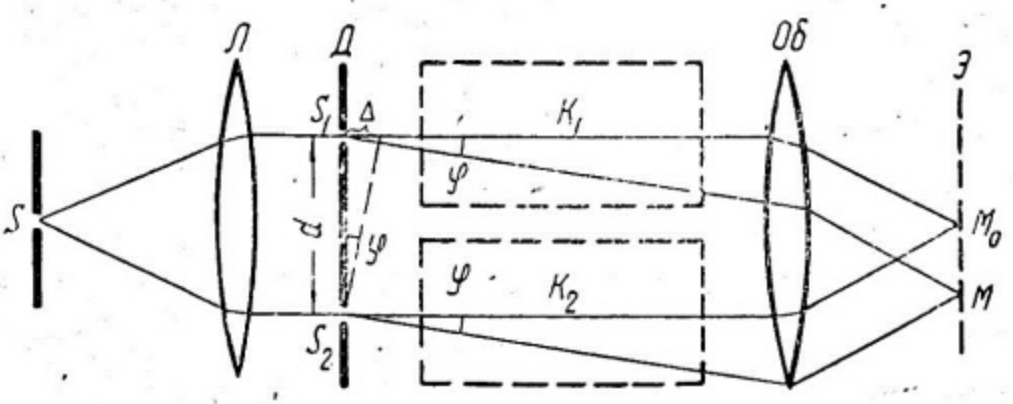

Рис. 12-1

освещенная щель, расположенная в передней фокальной плоскости линзы $Л$), лучи света, пройдя линзу $Л$, параллельным пучком падают на диафрагму $Д$ с двумя узкими щелями S_1

и S_2. Последние играют роль когерентных источников света. Дифрагированные от этих щелей пучки света проходят затем кюветы K_1 и K_2 с исследуемым веществом и собираются в фокальной плоскости *Э* объектива *Об*, где и образуется интерференционная картина — система чередующихся светлых и темных полос, параллельных щелям S, S_1 и S_2.

Распределение интенсивности в интерференционной картине определяется разностью фаз или оптической разностью хода интерферирующих лучей. Если, например, колебания источников S_1 и S_2 происходят в одной и той же фазе, то центр картины, соответствующий точке M_0 будет светлым. Здесь возникает нулевой максимум, отвечающий нулевой разности хода. Следующие максимумы возникнут в тех точках плоскости *Э*, для которых оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей будет равна целому числу световых длин волн λ. Из рис. 12-1 непосредственно видно, что $\Delta = d \sin \varphi$, где d — расстояние между источниками S_1 и S_2, φ — угол дифракции интерферирующих лучей. Таким образом, условие образования k-го максимума определяется соотношением

$$d \sin \varphi_k = k\lambda, \qquad (12.1)$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$

В тех же точках экрана, для которых оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн $\lambda/2 \left[\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \right]$, возникнут минимумы освещенности: в эти точки интерферирующие лучи приходят в противофазе.

Представим себе теперь, что, например, в кювете K_1, оптическая плотность вещества (показатель преломления n) начнет увеличиваться. В этом случае появится дополнительная разность хода интерферирующих лучей, которая будет зависеть от величины изменения показателя преломления Δn и длины кюветы l. Если длины обеих кювет одинаковы, то условие образования k-го максимума в данном случае выразится следующим соотношением

$$d \sin \varphi_k + l \cdot \Delta n = k\lambda. \qquad (12.2)$$

Из этой формулы видно, что изменение Δn вызовет соответствующее изменение угла φ_k, то есть смещение k-го максимума, а следовательно и смещение всей интерференционной картины. Так как смещение на ширину интерференционной полосы, то есть на расстояние между соседними максимумами (или минимумами), соответствует появлению дополнительной оптической разности хода в исследуемом веществе на целую длину волны λ, то, измерив величину смещения η в долях ширины полосы, по формуле

$$l \cdot \Delta n = \eta\lambda, \qquad (12.3)$$

легко найти изменение показателя преломления вещества Δn.

На измерении величины смещения интерференционных полос и основан метод определения показателя преломления воздуха, изучаемый в данной работе. Он заключается в следующем.

Из теории дисперсии света следует, что изменение показателя преломления газа Δn прямо пропорционально изменению давления газа Δp:

$$\Delta n = \frac{n_0 - 1}{p_0} \Delta p, \qquad (12.4)$$

где p_0 и n_0 — исходные значения давления газа и его показателя преломления.

Измерив на опыте зависимость Δn от Δp, по соответствующему графику находят значение коэффициента при Δp в формуле (12.4) и, зная величину p_0, вычисляют n_0.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из двух основных частей: интерферометра ИТР-1 и манометрической системы. Схема установки изображена на рис. 12-2.

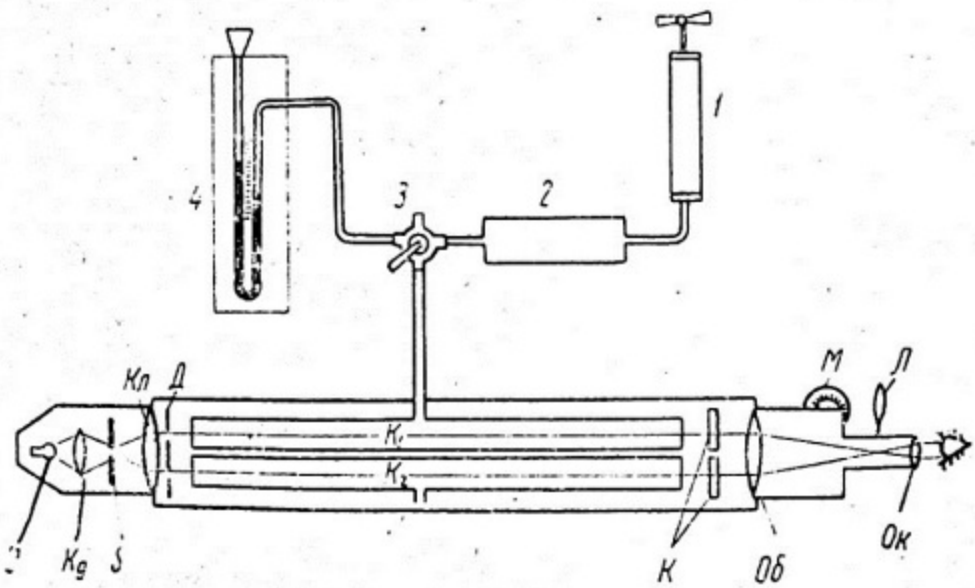

Рис. 12-2

Интерферометр включает в себя источник света C, конденсорную линзу $Кд$, щелевую диафрагму S, коллиматорную линзу $Кл$, диафрагму $Д$ с двумя узкими щелями, кюветы $К_1$ и $К_2$ — трубки с исследуемым газом, компенсатор $К$, представляющий собой две одинаковые плоско-параллельные стеклянные пластинки, одна из которых может поворачиваться вокруг горизонтальной оси прибора с помощью микрометра $М$, объек-

тив *Об* и окуляр *Ок*, через который наблюдают интерференционную картину, возникающую в фокальной плоскости объектива.

Кюветы K_1 и K_2 расположены в верхней части прибора, наполовину перекрывая щели диафрагмы *Д* по высоте. В результате в поле зрения окуляра наблюдаются две системы интерференционных полос: пучки лучей, проходящие под кюветами, образуют нижнюю *неподвижную* систему полос, пучки лучей, проходящие через кюветы, — верхнюю *подвижную* систему полос.

В том случае, когда оптическая разность хода в кюветах равна нулю, обе системы полос (верхняя и нижняя) совпадают друг с другом. Если же в одной из кювет изменять давление газа, а следовательно и его показатель преломления, то возникающая дополнительная разность хода приводит к смещению верхней системы полос относительно нижней, являющейся как бы индексом, по которому производится отсчет.

Поворотом подвижной пластинки компенсатора *К* вводится добавочная разность хода, с помощью которой можно скомпенсировать разность хода в кюветах, показателем чего является совмещение верхней системы полос с нижней. По шкале барабана микрометра *М* производятся соответствующие отсчеты через лупу *Л*.

Интерферометр ИТР-1 позволяет измерять малые разности показателей преломлений жидкостей и газов с точностью до 10^{-8}. Прибор тщательно отъюстирован, поэтому никакая самостоятельная регулировка его узлов недопустима, так как это может привести к его порче.

Манометрическая часть установки служит для создания определенных давлений газа — в одной из кювет. Она состоит из ручного насоса *1*, уравнительного баллона *2*, крана *3* и водяного манометра *4*.

Задание

1. Подготовка установки к опыту

Повернув ручку крана *3* (рис. 12-2) в положение «*атм*», привести давление воздуха в обеих кюветах к атмосферному.

Снять колпачок со зрительной трубы интерферометра и подключить прибор к внешней сети. Включив кнопочный выключатель на шнуре прибора, убедиться, что в поле зрения окуляра зрительной трубы появились верхняя и нижняя системы интерференционных полос. Отрегулировать накал лампочки осветителя так, чтобы яркость интерференционной картины была удобной для наблюдения. Вращением накатанного кольца окуляра добиться максимальной четкости видимой картины.

Поворотом ручки крана *3* в положение «*вкл*» соединить кювету прибора с насосом и манометром. Проверить далее установку на герметичность (отсутствие утечки воздуха из кюветы): насосом создать избыточное давление в кювете (около 200 *мм* водяного столба), поставить ручку крана в положение «*откл*» и в течение 10 минут наблюдать за изменением давления по манометру. За это время давление в кювете не должно изменяться более, чем на 2 *мм* водяного столба. В противном случае обратиться к лаборанту.

2. Проведение измерений

Соединив кран *3* с атмосферой, выравнять давление воздуха в обеих кюветах. Наблюдая в окуляр прибора, вращением микрометра *M* добиться совмещения обеих интерференционных картин (по центральной темной полосе). Совмещение произвести несколько раз до получения устойчивого отсчета в пределах одного деления по барабану микрометра.

Полученный отсчет i_0 — нулевой отсчет — записать. (Если отсчет i_0 превышает 100 делений, то прибор неисправен и следует обратиться к лаборанту).

Повернуть затем ручку крана в положение «*вкл*», создать насосом избыточное давление в 50 *мм* водяного столба и, повернув ручку крана в положение «*выкл*», произвести совмещение интерференционных полос (не менее трех раз). По барабану микрометра взять соответствующие отсчеты.

Аналогичную операцию и измерения проделать, увеличивая давление через каждые 50 *мм* водяного столба (вплоть до 500—600 *мм* вод. ст.). Значения избыточных давлений и соответствующие отсчеты i (по шкале барабана) записать в таблицу.

После этого следует определить ширину интерференционной полосы в делениях шкалы барабана микрометра (Δi). Выравняв давление воздуха в обеих кюветах поворотом ручки крана в положение «*атм*», сместить микрометром верхнюю систему интерференционных полос на несколько полос относительно нижней и отметить одновременно соответствующую разность отсчетов по барабану микрометра. Измерение повторить не менее трех раз. Из полученных результатов вычислить ширину одной полосы Δi в делениях шкалы барабана.

3. Определение показателя преломления воздуха

Так как величина смещения η в выражении (12.3) равна $\frac{i - i_0}{\Delta i}$, то расчетную формулу для определения Δn можно

представить в виде

$$\Delta n = \frac{i - i_0}{\Delta i} \cdot \frac{\lambda}{l}, \qquad (12.5)$$

где $\lambda = 0{,}55$ *мк*, $l = 100$ *см*.

Вычислив Δn по формуле (12.5) для каждого значения избыточного давления Δp в кювете, построить затем график зависимости Δn от Δp. Из наклона графика определить среднее значение отношения $\Delta n/\Delta p$, после чего по формуле (12.4) вычислить значение показателя преломления воздуха n_0, отвечающего исходному давлению p_0 (по барометру).

Работа 13

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА ФАЗОВОГО КОНТРАСТА

ВВЕДЕНИЕ

Возможность наблюдения микрообъектов с помощью микроскопа основана на том, что они иначе, чем окружающая среда, рассеивают, поглощают или отражают падающий на них свет. Изображение микрообъекта в микроскопе представляет собой результат интерференции рассеянного микрообъектом света и света, проходящего без отклонения через окружающие участки среды (невозмущенный свет). Качество получающегося изображения (степень контрастности) зависит при этом от соотношения амплитуд и фаз, рассеянного и невозмущенного света.

В связи с этим для различных объектов в зависимости от характера рассеяния ими света применяют различные методы наблюдения: методы светлого и темного поля, метод фазового контраста, наблюдение в поляризованном свете, в ультрафиолетовых лучах и др.

Метод светлого поля обычно применяется для наблюдения непрозрачных или окрашенных достаточно крупных микрочастиц. В этом методе через объектив микроскопа проходят как рассеянные, так и невозмущенные лучи.

Метод темного поля позволяет наблюдать более мелкие микрочастицы, не видимые с помощью метода светлого поля. В этом методе невозмущенные лучи света тем или иным способом задерживаются, так что в образовании изображения участвуют только рассеянные микрочастицами лучи. Этот метод позволяет обнаруживать *наличие* частиц, размеры которых во много раз меньше предела разрешения микроскопа.

Метод фазового контраста, изучаемый в настоящей работе, служит для наблюдения особо слабых микрообъектов, которые отличаются от окружающей среды в основном лишь показателем преломления. Такие объекты носят название *рефракционных структур*. Особенность этих структур

в том, что они изменяют *фазу* проходящей через них световой волны, не внося при этом заметных изменений в ее амплитуду.

Рефракционные структуры непосредственно наблюдать нельзя, ибо обычные приемники света (глаз, фотоэлемент, фотопластинка) реагируют не на фазу световых колебаний, а на их амплитуду. Метод же фазового контраста позволяет изменения фазы световых колебаний превратить в изменения амплитуды, чем и достигается значительное увеличение контрастности изображения.

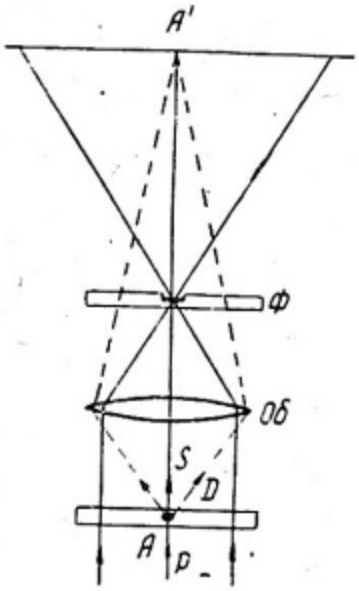

Рис. 13-1

Сущность метода фазового контраста заключается в следующем. Прозрачный объект, содержащий участок A (рис. 13-1) с несколько отличающимся показателем преломления, освещается параллельным пучком света. При этом часть света испытывает рассеяние (дифракцию) на участке A. Рассеянные лучи (пунктирные линии) с помощью объектива *Об* образуют изображение участка A в точке A'.

Обозначим световую волну, падающую на исследуемый объект, буквой P. Прохождение света через участок A приведет к возникновению двух волн — неотклоненной S и рассеянной D, причем векторы колебаний соответствующих волн связаны соотношением $\boldsymbol{P} = \boldsymbol{S} + \boldsymbol{D}$.

В случае рефракционных структур, как было сказано выше, волны P и S будут близки по амплитудам и мало отличаться по фазам, т. е. на соответствующей векторной диаграмме (рис. 13-2,*а*) $|\boldsymbol{P}| \approx |\boldsymbol{S}|$ и угол $\delta\varphi$ мал. Отсюда следует (это непосредственно видно из рисунка), что рассеянная волна D будет иметь малую амплитуду (вектор $\boldsymbol{D}$) и смещение по фазе относительно волн P и S почти на $\pi/2$ *.

---

* Аналитически это можно представить следующим образом: пусть $a\cos\omega t$ характеризует колебание волны P и $a\cos(\omega t + \delta\varphi)$ — колебание волны S, имеющей ту же амплитуду и небольшое смещение по фазе $\delta\varphi$. Из преобразования

$$a\cos(\omega t + \delta\varphi) = a\cos\delta\varphi\cdot\cos\omega t - a\sin\delta\varphi\cdot\sin\omega t \approx a\cos\omega t - a\cdot\delta\varphi \times$$

$$\times \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

видно, что волна S отличается от волны P наличием дополнительной волны D (последний член) с малой амплитудой и сдвинутой по фазе на $\pi/2$.

Так как амплитуда волны D, участвующей в образовании изображения участка A рефракционной структуры, значительно меньше амплитуд волн S и P, образующих светлый тон, то это не позволяет отличить интересующий нас участок от окружающей среды. Однако, если каким-либо образом задержать волны S и P, то изображение уже может быть наблюдено (метод темного поля).

Чтобы усилить эффект, в методе фазового контраста поступают следующим образом:

1. Волны S и P задерживают не полностью, а лишь ослабляют до интенсивности волны D и, кроме того,

2. Имеющуюся разность фаз ($\pi/2$) между волнами D и S, P с помощью специальной пластинки изменяют еще на $\pm\pi/2$, вследствие чего вектор $\boldsymbol{D}$ повернется на угол $\pi/2$ и окажется направленным по или против вектора $\boldsymbol{S}$ (а также и $\boldsymbol{P}$) (рис. 13-2,*б*).

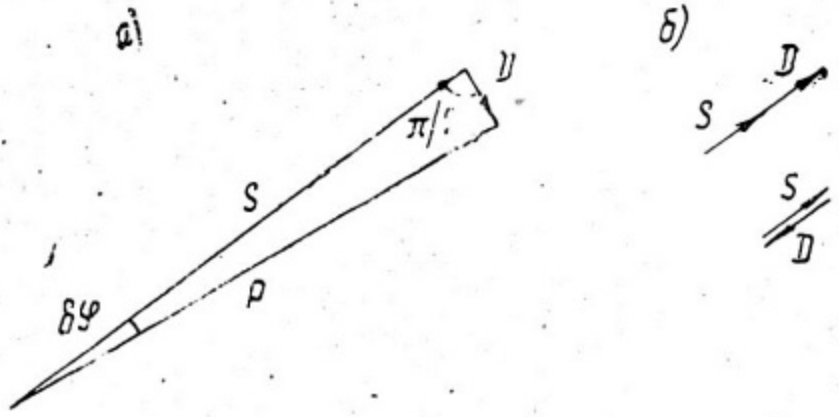

Рис. 13-2

В результате интерференционный эффект в плоскости изображения приводит к наибольшему усилению (или почти полному ослаблению) изображения исследуемого объекта на фоне, обусловленном волнами S и P, чем и достигается максимум контраста изображения.

С этой целью в фокальной плоскости объектива *Об* (рис. 13-1) устанавливают так называемую *фазовую пластинку Ф*. Она представляет собой прозрачную стеклянную пластинку с утоньшением в месте прохождения невозмущенных лучей. Утоньшение покрыто тонким полупрозрачным металлическим слоем и сделано с таким расчетом, чтобы разность оптических путей для световых лучей, проходящих через утоньшение и помимо его, составляла четверть длины волны, что и соответствует разности фаз в $\pi/2$. В результате невозмущенный свет проходит, сильно ослабляясь, через поглощающую часть фазовой пластинки (полупрозрачный метал-

лический слой), рассеянная же волна D — в основном через прозрачную часть пластинки, приобретая дополнительную разность фаз $\pi/2$.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В настоящей работе используется специальный микроскоп с фазовым объективом. Данный микроскоп позволяет производить визуальное исследование и фотографирование объектов в проходящем свете как в светлом поле, так и в темном поле с фазовым контрастом.

Принципиальная оптическая схема микроскопа (вместе с осветителем) показана на рис. 13-3. Источником света здесь служит кольцевой вырез в диафрагме *Д*, освещаемой светом от осветителя *Осв*. Диафрагма *Д* расположена в фокальной плоскости конденсорного объектива *К*, благодаря чему свет, проходящий через *К*, преобразуется в пучки параллельных лучей. Последние проходят затем исследуемый объект *А* и собираются в фокальной плоскости *Ф* объектива микроскопа *Об*, образуя изображение кольцевого выреза диафрагмы *Д*. Именно в этом месте и установлена фазовая пластинка *Ф*, на которой выгравировано кольцевое утоньшение с нанесенным на нем тонким полупрозрачным металлическим слоем. Размер кольца таков, что получающееся изображение кольцевого выреза диафрагмы *Д* полностью укладывается на нем. Это приводит к сильному ослаблению прямого света, идущего непосредственно от осветителя, в то время как рассеянный участком *А* свет (пунктирные линии) в основном

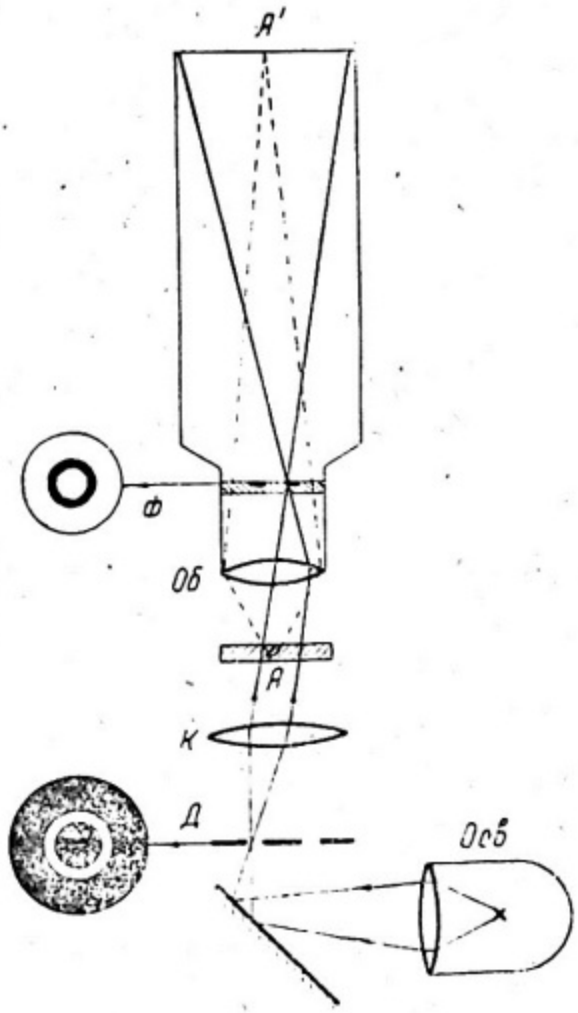

Рис. 13-3

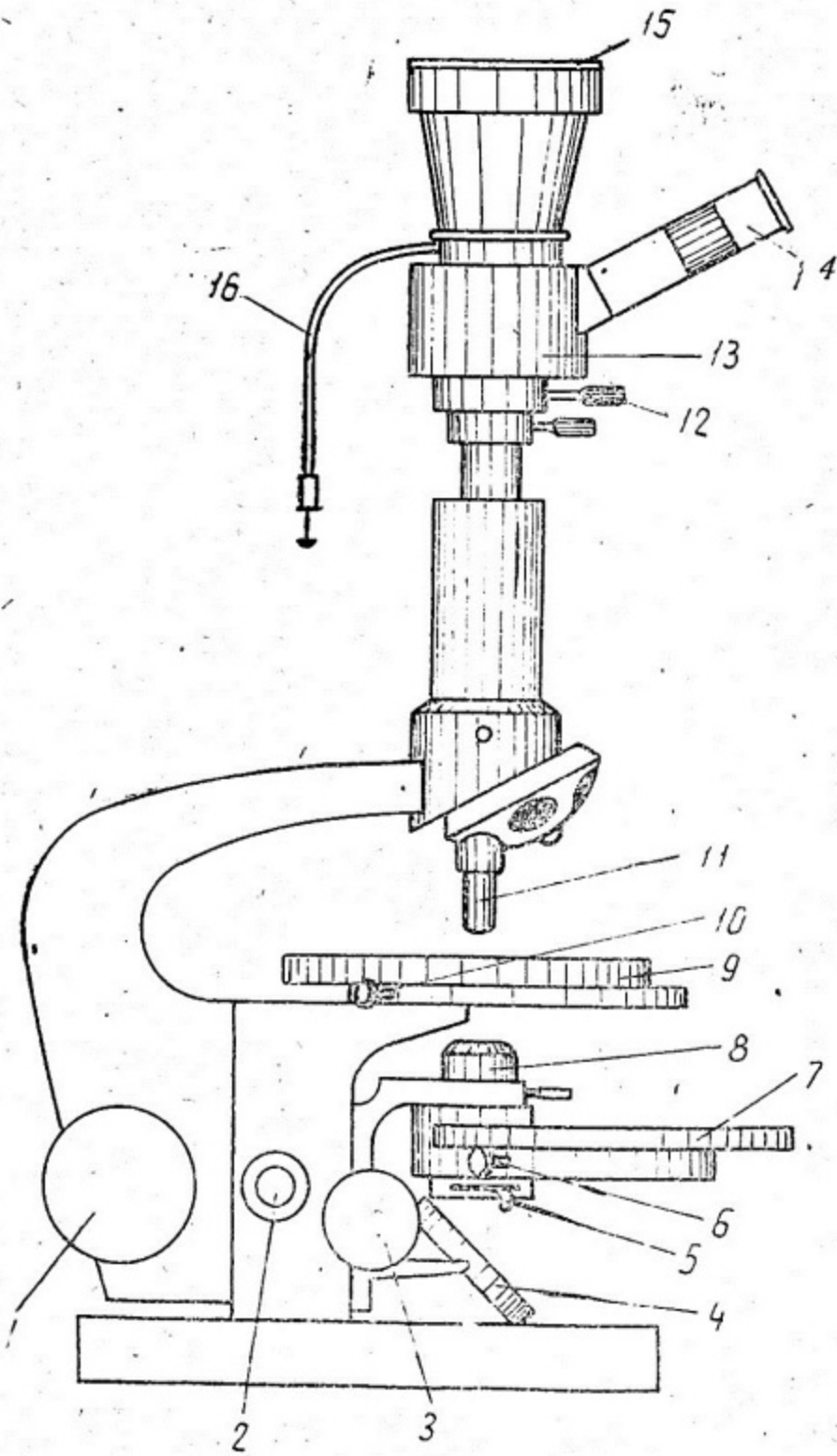

Рис. 13-4

минует затемненное кольцо фазовой пластинки и, не ослабляясь, доходит до плоскости изображения A'.

Внешний вид микроскопа изображен на рис. 13.4. Здесь *4* — осветительное зеркало, *5* — регулятор полевой диафрагмы, *7* — револьверный диск с наобором кольцевых диафрагм, центрирование которых осуществляется двумя винтами *6* (другой винт расположен на противоположной стороне), *8* — конденсор, *9* — предметный столик, горизонтальное перемещение которого производится винтом *10*, *11* — объектив микроскопа, *13* — фотонасадка, закрепляемая винтом *12* на тубусе микроскопа (внутри тубуса в верхней части находится окулярный вкладыш), *14* — монокулярная насадка, *15* — кассета для фотопластинки, *16* — тросик для фотосъемки. Резкость изображения на фотопластинке контролируется с помощью монокулярной насадки. Вертикальное перемещение тубуса микроскопа осуществляется барашком *1* грубой наводки и барашком *2* тонкой наводки. Перемещение конденсора производится барашком *3*.

К микроскопу прилагается специальный вкладыш — длиннофокусный микроскоп — для настройки по фазовому кольцу.

Задание

1. Настройка микроскопа

Включить осветитель на минимальное напряжение и, глядя в монокулярную насадку, добиться равномерной освещенности поля зрения с помощью поворотов зеркала *4* (рис. 13-4) и перемещения конденсора барашком *3*. При этом полевая диафрагма *5* должна быть максимально открыта, а кольцевая диафрагма выведена (поворотом диска *7* до слабого щелчка) в одно из промежуточных положений (эти положения не обозначены цифрами в окошечке револьверного диска).

Поместить исследуемый объект на предметный столик и, перемещая тубус микроскопа * сначала барашком грубой, затем — тонкой наводки, добиться четкого изображения данного объекта. Это положение тубуса в процессе дальнейшей настройки микроскопа *должно оставаться неизмененным* (барашки грубой и тонкой наводки не трогать!).

Далее произвести настройку микроскопа на фазовый контраст. Для этого исследуемый объект вывести из хода лучей, снять фотонасадку *13*, освободив предварительно винт *12*, вы-

* Во избежание повреждения объектива при соприкосновении с предметным стеклом перемещать тубус следует снизу вверх, предварительно опустив его почти до соприкосновения с пластинкой.

нуть окулярный вкладыш из верхней части тубуса и вставить на его место специальный вкладыш (длиннофокусный микроскоп), прилагаемый к прибору. Перемещением верхней части вкладыша добиться четкого видения фазового кольца.

Поворотом диска *7* ввести в ход лучей одну из кольцевых диафрагм и вращением барашка *3* добиться максимально четкого изображения светлого кольца. После этого поворотом диска *7* ввести такую кольцевую диафрагму, изображение которой полностью укладывалось бы внутри затемненного кольца фазовой пластинки (центрирование кольцевой диафрагмы осуществляется винтами *6*). Номер данной кольцевой диафрагмы записать.

На этом настройка микроскопа заканчивается. Необходимо иметь в виду, что эффективность метода фазового контраста в сильной степени зависит от точности настройки прибора, поэтому ее следует выполнить с максимальной тщательностью.

2. Фотографирование микрообъекта

Закончив настройку микроскопа, установить окулярный вкладыш и фотонасадку на прежнее место. Поворотом диска *7* вывести кольцевую диафрагму из хода лучей, открыв все поле.

После этого поместить исследуемый объект на предметный столик и вращением барашка *2* тонкой наводки добиться максимальной четкости изображения объекта в поле зрения монокулярной насадки.

Горизонтальным перемещением предметного столика ввести наиболее интересный участок объекта в область, ограниченную прямоугольником в поле зрения монокулярной насадки (эта область проектируется на фотопластинку).

Ввести в ход лучей ранее выбранную кольцевую диафрагму. При этом контрастность изображения (если настройка была произведена правильно) должна значительно повыситься, т. е. должны появиться детали, которые в светлом поле были незаметны или неотчетливы. Для более правильного сравнения обеих изображений освещенность изображения в светлом поле следует каждый раз уменьшать полевой диафрагмой *5* так, чтобы освещенность в обоих случаях была приблизительно одинаковой.

Показав результаты настройки преподавателю (или лаборанту), выяснить время экспозиции, после чего зарядить кассету пленкой и произвести снимок как в светлом поле, так и в темном поле с фазовым контрастом. Напряжение осветителя при съемке увеличить до 17 *в*.

Проявить пленку согласно приложению в конце сборника. Полученные фотоснимки показать преподавателю и получить от него дальнейшие указания.

Наиболее удачную пару снимков тщательно просушить в сушильном шкафу и провести затем их анализ.

Работа 14

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА ОТ ЩЕЛИ

ВВЕДЕНИЕ

Ограничение световых пучков различного рода препятствиями (узкие щели, отверстия, экраны, резкие неоднородности среды) сопровождается явлением дифракции света, выражающимся в огибании последним краев препятствий, или, другими словами, в нарушении прямолинейности его распространения. Дифракция света обусловлена его волновой природой и объясняется тем, что ограничение световых волн вызывает нарушение тех условий интерференции, которые в отсутствии ограничивающих препятствий приводили бы к прямолинейному распространению света.

Дифракцию света обычно наблюдают или непосредственно (дифракция Френеля), или в фокальной плоскости линзы, расположенной на пути дифрагированного света (дифракция Фраунгофера).

В данной работе изучается простейший вид дифракции Фраунгофера — дифракция от узкой прямоугольной щели.

Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально на узкую прямоугольную щель (рис. 14-1), ширина которой b значительно меньше ее длины. Найдем распределение освещенности дифрагированного света на экране $Э$, находящемся в фокальной плоскости линзы $Л$.

Согласно принципу Гюйгенса—Френеля каждый элемент щели при наличии светового поля становится источником вторичных когерентных световых волн. Результирующее колебание в произвольной точке M экрана определяется суммированием вторичных волн, приходящих в данную точку от всех элементов щели, с учетом их амплитуд и фаз.

Рассмотрим бесконечно узкую зону шириной dx (рис. 14-1). Колебания от этой зоны будут приходить в точку M с запаздыванием по фазе относительно колебаний, при-

ходящих от левого края щели вследствие наличия разности хода, равной $x \sin \varphi$*. Поэтому элементарное световое возмущение ds, приходящее в точку M от элемента dx, выразится следующим образом:

$$ds = \frac{A}{b} dx \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \varphi\right), \qquad (14.1)$$

где A — амплитуда волны, посылаемой всей щелью в направлении угла $\varphi = 0$, λ — длина волны.

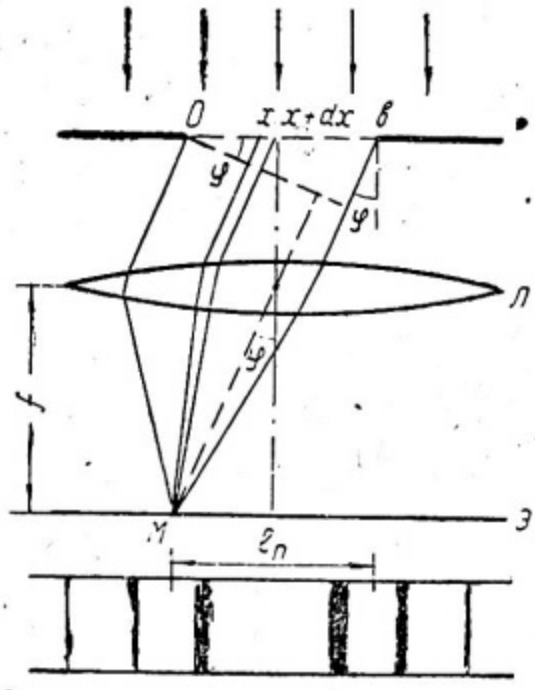

Рис. 14-1

Суммарное колебание s в точке M определяется суммой (интегралом) элементарных колебаний ds, приходящих от всех элементов щели, т. е. $s = \int_0^b ds$. После соответствующих преобразований получим

$$s = A \frac{\sin\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}} \cos\left(\omega t - \frac{k\pi \sin \varphi}{\lambda}\right). \qquad (14.2)$$

Отсюда интенсивность света, которая, как известно, пропорционально квадрату амплитуды светового колебания, равна

$$I = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)^2}. \qquad (14.3)$$

* Линза не вносит дополнительной разности хода (*таутохронизм*).

Графически зависимость интенсивности I от $\sin\varphi$ представлена на рис. 14-2.

Из выражения (14-3) не трудно найти, что положения минимумов и максимумов кривой распределения интенсивности I соответствуют углам дифракции φ_n удовлетворяющим условию:

$$b \sin \varphi_n = n\lambda, \tag{14.4}$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$ для *минимумов* и $n = 0, 1{,}43, 2{,}46, 3{,}47, 4{,}48, \ldots$ для *максимумов*.

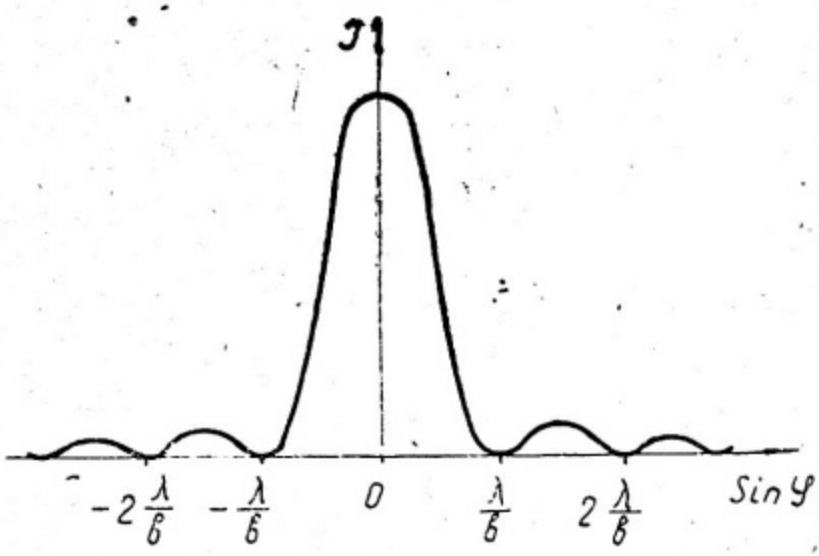

Рис. 14-2

Формула (14.4) позволяет определить длину световой волны, если известна ширина щели b и линейные расстояния l_n между симметрично расположенными максимумами или минимумами. Тогда, согласно рис. 14-1, для малых углов дифракции имеем

$$\lambda = \frac{b}{2f} \cdot \frac{l_n}{n}, \tag{14.5}$$

где f — фокусное расстояние линзы *Л*.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Получение дифракции Фраунгофера от щели осуществляется в настоящей работе на установке, оптическая схема которой показана на рис. 14-3. Установка состоит из осветителя *Осв*, коллиматора *Кол*, исследуемой щели *Щ*, и съемочной камеры *Ф*. Свет от осветителя, проходя светофильтр *С* и щелевую диафрагму *Д*, расположенную в фокальной плос-

кости объектива коллиматора, преобразуется последним в пучок параллельных лучей. Далее свет проходит, дифрагируя, исследуемую щель *Щ*. Дифрагированные пучки собираются в фокальной плоскости объектива съемочной камеры и образуют в этой плоскости систему чередующихся светлых и темных полос.

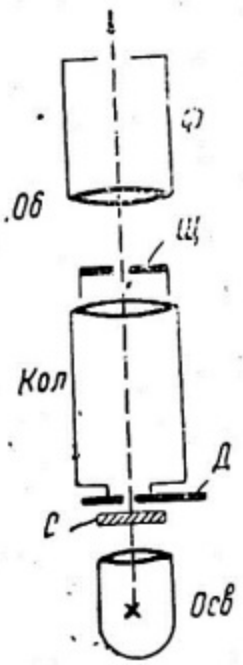

Рис. 14-3

Верхний торец съемочной камеры снабжен специальным пазом, в который вставляется, по необходимости, или окулярная насадка (для визуального наблюдения дифракционной картины), или кассета с фотопленкой (для фотографирования данной картины).

Промер полученной фотографии производится на микрофотометре МФ-2.

Микрофотометр МФ-2 представляет собой прибор, служащий для фотометрирования спектрограмм. Оптическая схема данного прибора (рис. 14-4) состоит из двух частей: фотометрической и отсчетной.

В фотометрической части свет от лампы *1* проходит через конденсорную линзу *2*, осветительную щель *3*, образованную двумя пластинками из зеленого стекла, поворотную призму *4* и микрообъектив *5*, проектирующий изображение осветительной щели на эмульсионный слой исследуемой фотопленки *Ф*. При этом на фотопленке получается изображение осветительной щели в виде яркой белой полоски, окруженной зеленым полем. Далее поверхность фотопленки с изображением осветительной щели проектируется посредством верхнего микрообъектива *6*, поворотной призмы *7* и дополнительных линз *8*, *9* * на наблюдательный экран *10* с прямоугольным вырезом в середине. Непосредственно за этим вырезом расположена измерительная щель *11*, с помощью которой фотометрируемый участок ограничивается по высоте и ширине. Затем свет проходит через серый круговой клин *12* и ступенчатый клин *13*, которые служат для ослабления интенсивности светового потока, и попадает на фотоэлемент *14*, электрически связанный с гальванометром *Г*.

Отсчетная часть микрофотометра смонтирована на базе зеркального гальванометра *Г*, подвижное зеркало *17* которого дает отклонения, соответствующие интенсивности света, прошедшего через фотометрируемый участок и попавшего на

---

* Линзы *8* и *9* служат для изменения увеличения проекционной системы.

фотоэлемент. Здесь свет от лампы *1* через конденсорную линзу *15* освещает прозрачную пластинку *16* с тремя шкалами. Изображение этих шкал проектируется с помощью зеркала *17*, линзы *18* и зеркала *19* на матовый экран *20*, снабженный отсчетным индексом.

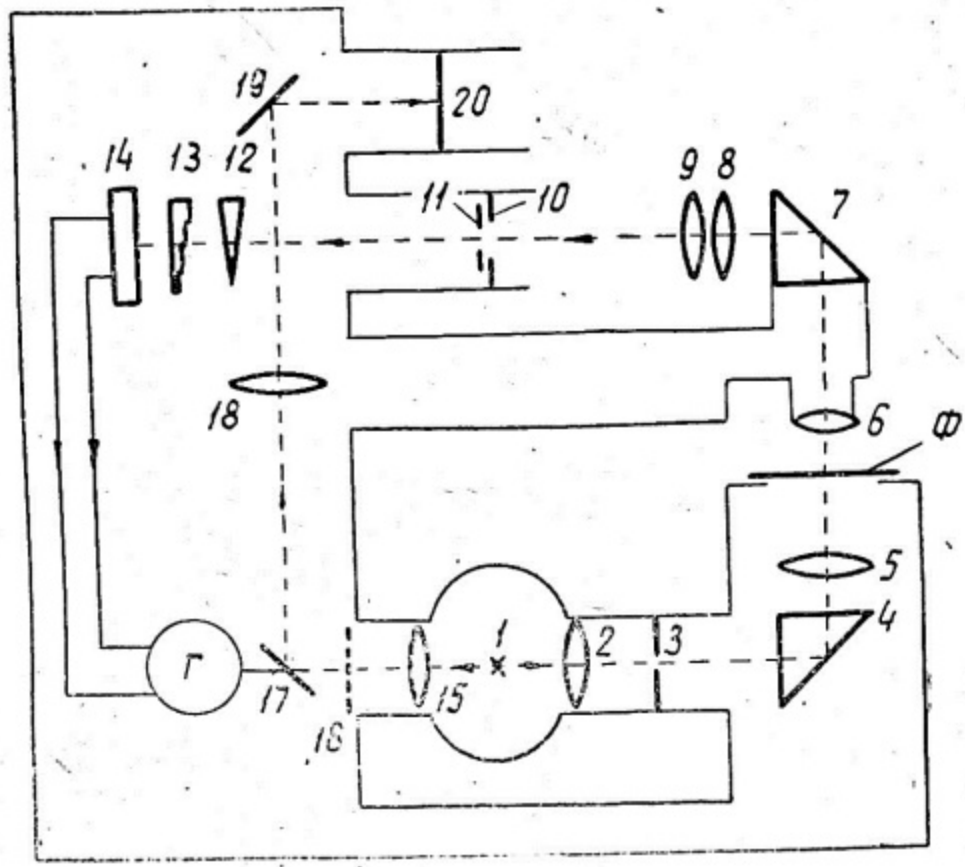

Рис. 14-4

Внешний вид микрофотометра представлен на рис. 14-5. Фотопленка помещается на столик *1* между двумя стеклянными пластинками, прижимаемыми пружинными лапками. Столик допускает продольные перемещения вращением микрометрического барабана *2* и поперечные — вращением винта *8*. Быстрое продольное перемещение столика осуществляется от руки при раскреплении винта *3*. Отсчет продольного перемещения производится по шкале *5*.

Фокусировка изображения спектрограммы на наблюдательный экран *16* достигается вращением винта *18*.

Изображение осветительной щели фокусируется на эмульсионный слой маховичком *7*. Поворот и ширина щели регулируется рукояткой *9*. Установка изображения осветительной щели симметрично измерительной щели на наблюдательном экране производится поворотом винтов *19*.

Измерительная щель на наблюдательном экране регулируется по высоте планками *10*, по ширине — барабаном *12*, наклон щели — рукояткой *11*.

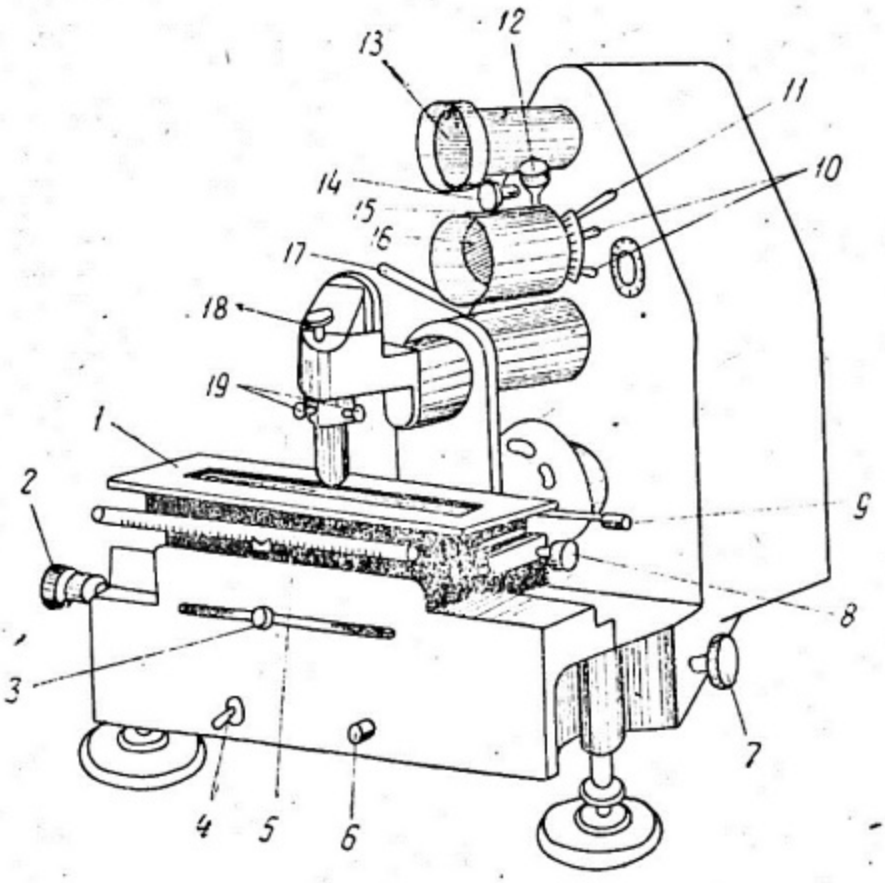

Рис. 14-5

Маховичком *15* (на рисунке не виден) изменяется положение серого ступенчатого клина (коэффициент пропускания ступеней клина указан индексами: 1, 1/2, 1/4, 1/8). Положение серого кругового клина регулируется вращением рукоятки *6*.

В поле зрения матового экрана *13* виден небольшой участок одной из шкал. Смена шкал производится вращением маховичка *14*.

Рукоятка *17* служит для установки начала шкалы с индексом на матовом экране *13* при выключенном фотоэлементе. Включение и выключение последнего осуществляется тумблером *4*.

Задание

1. Фотографирование дифракционной картины

Вставить в паз съемочной камеры установки окулярную насадку, снять насадку с исследуемой щелью и вынуть зеле-

ный светофильтр *. Включить осветитель. В поле зрения окуляра должна появиться узкая яркая полоска — изображение коллиматорной щели.

Установить на объектив коллиматорной трубы насадку с исследуемой щелью так, чтобы последняя была параллельна изображению коллиматорной щели. В поле зрения окуляра должна появиться дифракционная картина — система светлых и темных полос. Слегка поворачивая насадку с исследуемой щелью, добиться максимальной четкости полученной картины. Установить затем светофильтр на прежнее место и после повторного просмотра дифракционной картины осветитель выключить.

Зарядить в фотокабине (или фотоящике) кассету пленкой (эмульсией к шторке), установить ее на место окулярной насадки и, выдвинув шторку кассеты (не до конца), включить осветитель на время, заданное преподавателем.

Выключив осветитель, задвинуть шторку кассеты. Пленку проявить согласно приложению в конце сборника и, показав преподавателю, положить в сушильный шкаф.

2. Промер дифракционной картины и определение длины световой волны

Пока пленка просыхает, ознакомиться с устройством микрофотометра. Под руководством лаборанта настроить прибор. Потренироваться в работе с прибором, используя одну из старых спектрограмм.

Затем высохшую пленку поместить на столик микрофотометра между двумя стеклами, предварительно тщательно протерев их. Пленку расположить так, чтобы дифракционные полосы были перпендикулярны направлению продольного перемещения столика.

Маховичком *14* (рис. 14-5) ввести в поле зрения экрана *13* среднюю шкалу (∞, 0) — шкалу почернений.

Отрегулировав ширину осветительной и измерительной щели в соответствии с шириной дифракционных полос, включить фотоэлемент тумблером *4*. Серые клинья установить в положение, при котором показания шкалы почернений будут наименьшими. После этого можно приступить к измерениям.

Перемещая столик микрометрическим барабаном *2* и наблюдая одновременно за отклонением шкалы экрана *13*, записать последовательно координаты всех максимумов и мини-

---

* При использовании позитивной пленки работа производится вообще без светофильтра *С*: его роль играет сама пленка, которая чувствительна лишь в сине-фиолетовой области спектра.

мумов (по микрометру). Измерения проделать не менее трех раз.

Найти по полученным результатам расстояния l_n между симметрично расположенными минимумами и максимумами, а также отношения l_n/n, где значения n взять из введения к данной работе. Вычислив среднее значение отношений l_n/n и зная ширину щели b и фокусное расстояние объектива съемочной камеры f (b и f указаны на установке), определить по формуле (14.5) среднее значение длины световой волны λ.

Работа 15

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЗРАЧНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционная решетка является одним из наиболее важных спектральных приборов. С помощью этого прибора производятся весьма разнообразные исследования спектров, дающих обширную информацию о строении и свойствах атомов и молекул вещества.

Изучаемая в настоящей работе прозрачная дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа параллельных штрихов, нанесенных на равных расстояниях друг от друга на поверхности пластмассовой пластинки. Такая структура обладает периодически изменяющимся коэффициентом поглощения.

Принцип действия решетки состоит в следующем. При падении плоской монохроматической световой волны на решетку, каждый элемент ее поверхности становится согласно принципу Гюйгенса источником вторичных когерентных световых волн. Результирующее световое колебание в любой точке пространства определяется суммированием вторичных волн, приходящих в данную точку от всех элементов решетки, с учетом их амплитуд и фаз.

Если на пути дифрагированных волн поставить собирательную линзу, то в фокальной плоскости ее будет наблюдаться дифракционный спектр, состоящий из ряда отдельных максимумов. Максимумы возникают в тех направлениях, для которых оптическая разность хода двух лучей, исходящих из соответствующих элементов соседних прозрачных щелей, равна целому числу длин волн.

Условие возникновения максимумов при нормальном падении света на решетку легко получить с помощью рис. 15-1. Из рисунка непосредственно видно, что разность хода лу-

чей *1* и *2* равна $d \sin \varphi$, где d — постоянная решетки, φ — угол дифракции. Максимум k-го порядка ($k = 0, \pm 1, \pm 2$), имеет место для угла φ_k, удовлетворяющего равенству

$$d \sin \varphi_k = k\lambda, \qquad (15.1)$$

где λ — длина световой волны.

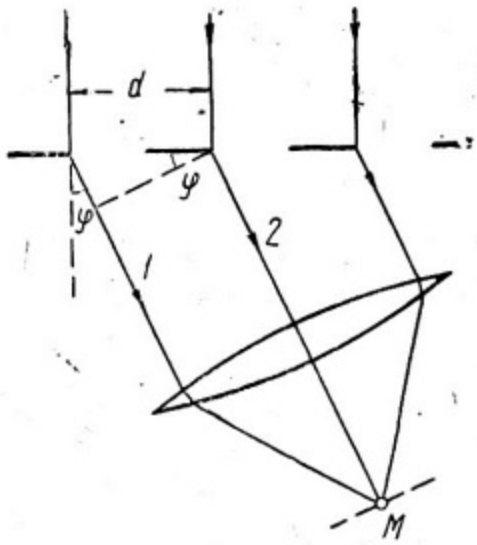

Рис. 15-1

Из формулы (15.1) следует, что в том случае, когда исследуемый свет содержит различные длины волн, решетка разложит его в спектр. В центре ($\varphi_0 = 0$) возникнет белая полоса — нулевой максимум для всех длин волн. Справа и слева от нулевого максимума возникнут линейчатые спектры различных порядков ($k = 1, 2, 3 \ldots$). В каждом из спектров максимумы более коротких длин волн располагаются ближе к центральной полосе, максимумы более длинных волн — дальше.

Качество спектра, т. е. расстояния между спектральными линиями и их ширина, определяется спектральными характеристиками прибора — *дисперсий* и *разрешающей способностью*.

Дисперсия характеризует способность спектрального прибора пространственно разделять пучки лучей различных длин волн. Дисперсия (угловая) определяется угловым расстоянием $\Delta\varphi$ между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\Delta\lambda = 1$Å. Мерой угловой дисперсии является отношение $\Delta\varphi/\Delta\lambda$.

Выражение для угловой дисперсии решетки легко получить, продифференцировав соотношение (15.1) по λ:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = \frac{k}{d\cos\varphi}. \qquad (15.2)$$

Разрешающая способность характеризует способность спектрального прибора разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн. За меру разрешающей способности принимается отношение $\lambda/\delta\lambda$, где λ — длина волны, около которой производится измерение, $\delta\lambda$ — наименьшая разница в длинах волн двух разрешаемых спектральных линий. Величина $\delta\lambda$ определяется *условием Рэлея*: две близкие спектральные линии считаются разрешенными, если максимум одной из них совпадает с первым минимумом другой.

Из теории следует, что разрешающая способность дифракционной решетки

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN, \qquad (15.3)$$

где k — порядок спектра, N — полное число действующих штрихов решетки.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Данная работа выполняется на установке, состоящей из источника света и дифракционной решетки, установленной на гониометре — приборе, предназначенном для точных измерений углов.

Оптическая схема установки изображена на рис. 15-2. Свет из осветителя *Осв* (ртутная лампа, заключенная в за-

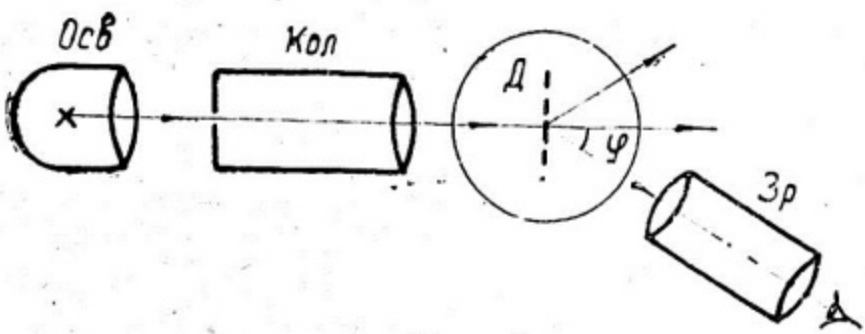

Рис. 15-2

щитный кожух, в окошке которого находится конденсорная линза) проходит через коллиматор *Кол*, в передней фокаль-

ной плоскости объектива которого находится узкая прямоугольная щель, и параллельным пучком падает на дифракционную решетку *Д*. Наблюдение дифрагированного света ведется с помощью зрительной трубы *Зр*, в фокальной плоскости объектива которой образуется спектр, состоящий из ряда ярких линий.

Внешний вид гониометра показан на рис. 15-3. Здесь

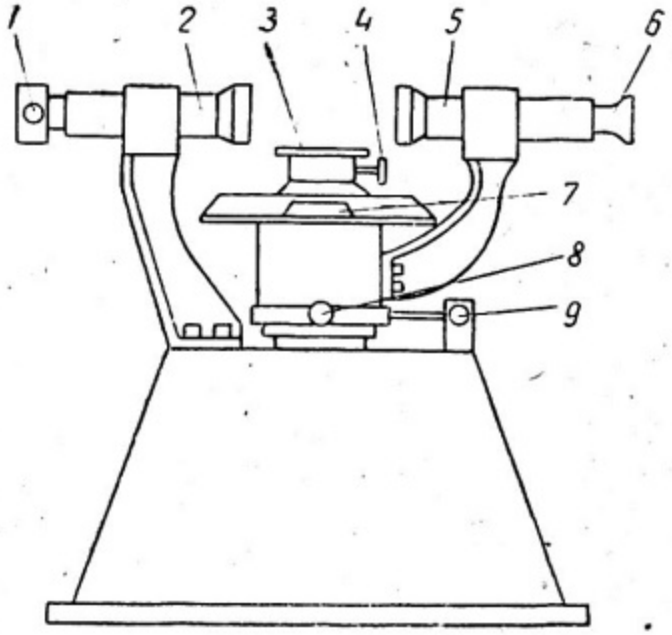

Рис. 15-3

1 — винт, регулирующий ширину коллиматорной щели; *2* — коллиматор, жестко укрепленный на массивном основании; *3* — предметный столик, на который помещают исследуемую решетку; *4* — стопорный винт, с помощью которого столик закрепляется в определенном положении относительно вертикальной оси; *5* — зрительная труба, которая может перемещаться вокруг той же вертикальной оси прибора. В фокальной плоскости окуляра *6* зрительной трубы расположен визирный крест (два перпендикулярных штриха). Положение трубы фиксируется через окошко *7* по шкале лимба, снабженного нониусом (цена деления шкалы лимба 0,5°, точность отсчета по нониусу 1′). Винт *8* служит для закрепления зрительной трубы в определенном положении; при закрепленном винте *8* винтом *9* можно осуществлять тонкие перемещения трубы.

Для облегчения отсчетов по нониусу прибора служит специальная лупа с лампочкой для подсвета.

Задание

1. Измерение положения спектральных линий

Подключить установку к внешней сети. Вращением ручки автотрансформатора увеличить напряжение на ртутной лампе до потенциала зажигания. Когда лампа зажжется, установить величину тока не более $2a$.

Поместить дифракционную решетку на столик гониометра в положение, перпендикулярное направлению падающего света. Регулируя положение окуляра зрительной трубы и ширину коллиматорной щели, получить в поле зрения трубы изображение четких и узких спектральных линий.

Слегка поворачивая столик с решеткой и наблюдая одновременно за одной из линий спектра (лучше всего наиболее удаленной от центрального максимума), добиться того, чтобы расстояние между этой линией и центральным максимумом стало минимальным[1]. В этом положении столик закрепить винтом 4. Можно показать, что таким путем достигается более точная установка решетки в положение, перпендикулярное падающему свету[2].

Далее промерить положение всех спектральных линий (фиолетовой, сине-фиолетовой, зеленой и желтой) в трех порядках по обе стороны от центрального максимума. Отсчет положения каждой спектральной линии брать по правому нониусу после совмещения визирной нити зрительной трубы с серединой линии. Одновременно с этим отмечать цвет линии и порядок спектра, в котором она наблюдается.

Указанные измерения проделать не менее трех раз для каждой линии.

Результаты измерений занести в табл. 15.1, где $i_л$ и $i_п$ — отсчеты положения некоторой спектральной линии соответственно слева и справа от центрального максимума.

В заключение измерить ширину исследуемой решетки имея в виду, что она заполняет все окошко.

---

[1] Полезно убедиться, что положение центрального максимума не меняется при поворотах решетки.

[2] Если свет падает на решетку под некоторым углом падения α, то для достаточно грубой решетки углы дифракции будут малыми, и в этом случае имеет место условие

$$d \cos \alpha \cdot \gamma_k = k\lambda,$$

где γ_k — угол между направлениями на нулевой максимум и максимум k-го порядка. Из этой формулы непосредственно видно, что при нормальном падении света на решетку, т. е. при $\alpha = 0$, угол γ_k будет наименьшим.

Таблица 15.1

№ п/п	Цвет линии	Порядок спектра k	Отсчеты по нониусу		Угол дифракции $\varphi_к = \frac{i_л - i_п}{2}$	Период решетки d
			$i_л$	$i_п$		

2. Обработка результатов измерений

Прежде всего вычислить по полученным результатам значения углов дифракции $\varphi_к$ и их средние значения для каждой линии.

Затем, зная длину волны зеленой линии (546 *ммк*) и углы дифракции этой линии во всех порядках спектра, вычислить по формуле (15.1) значения постоянной решетки d. Из полученных результатов найти ее среднее значение.

Определив постоянную решетки, вычислить с помощью той же формулы (15.1) длины волн остальных спектральных линий и их средние значения.

После этого найти угловую дисперсию решетки для спектра 2-го порядка, непосредственно вычислив отношение $\Delta\varphi/\Delta\lambda$. Полученный результат проверить с помощью формулы (15.2).

Зная ширину решетки и ее постоянную, вычислить по формуле (15.3) разрешающую способность решетки также для спектра 2-го порядка.

Работа 16

ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционная решетка является одним из наиболее важных спектральных приборов, позволяющих производить весьма тонкие исследования спектров атомов и молекул вещества. Дифракционные решетки подразделяются на прозрачные и отражательные. Отражательные решетки имеют существенное преимущество перед прозрачными: они позволяют исследовать значительно более широкий диапазон спектра электромагнитных волн, в то время как возможности прозрачных решеток ограничены из-за селективного поглощения в стекле.

Изучаемая в настоящей работе отражательная решетка представляет собой совокупность большого числа расположенных на равных расстояниях друг от друга штрихов одинакового профиля, нанесенных алмазным резцом на зеркальную металлическую поверхность. Такая структура обладает периодически изменяющимся коэффициентом отражения.

Принцип действия решетки состоит в следующем. При падении плоской монохроматической световой волны на решетку каждый элемент ее поверхности, согласно принципу Гайгенса, становится источником когерентных вторичных волн. Результирующее световое колебание в любой точке пространства определяется суммированием вторичных волн, приходящих в данную точку от всех элементов решетки, с учетом их амплитуд и фаз.

Если на пути дифрагированных волн поставить собирательную линзу, то в фокальной плоскости ее будет наблюдаться дифракционный спектр, состоящий из ряда отдельных максимумов. Максимумы возникают в тех направлениях, для которых оптическая разность хода двух лучей, исходящих из соответствующих элементов соседних штрихов, равна целому числу длин волн.

Условие, при котором возникают максимумы, легко получить с помощью рис. 16-1, где для простоты показаны только два луча. Из рисунка непосредственно видно, что оптическая разность хода лучей *1* и *2* ($AB—CD$) равна $d(\sin\beta - \sin\alpha)$, где d — постоянная решетки, α — угол падения, β — угол диф-

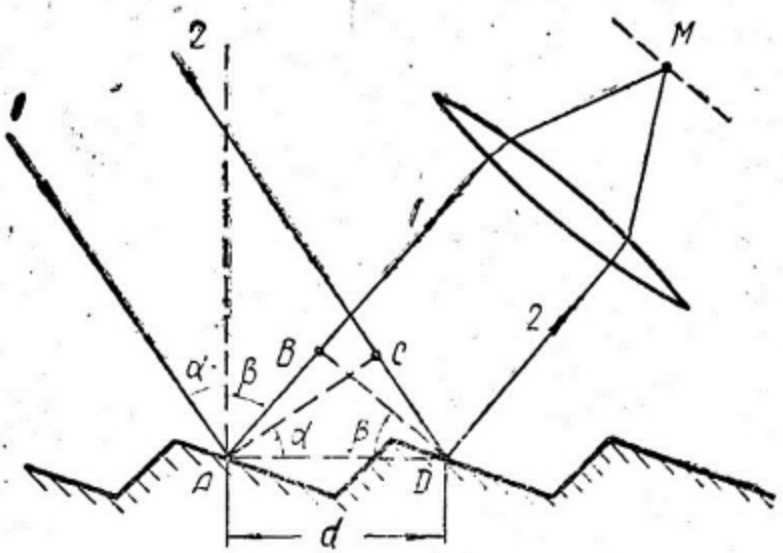

Рис. 16-1

ракции. Максимум k-го порядка имеет место для угла β_k, удовлетворяющего условию

$$d(\sin\beta_k - \sin\alpha) = k\lambda, \qquad (16.1)$$

где $k = 0, \pm1, \pm2, \ldots$, λ — длина световой волны. Знак минус в скобке соответствует случаю, когда углы α и β_k расположены по разные стороны от нормали к решетке (именно этот случай и используется в данной работе).

Если исследуемый свет содержит различные длины волн, то решетка разложит его в спектр, в котором каждой длине волны будет соответствовать ряд максимумов различных порядков. В направлении зеркального отражения ($\beta_0 = \alpha$), как видно из формулы (16.1), имеет место максимум нулевого порядка для всех длин волн (яркая белая линия). Затем идут спектральные линии, отвечающие максимумам 1-го порядка, 2-го и т. д. Причем линии с более короткими длинами волн в каждом порядке спектра располагаются ближе к нулевому максимуму.

Качество спектра — расстояние между линиями и их ширина — определяется спектральными характеристиками прибора — *дисперсией* и *разрешающей способностью*.

Дисперсия характеризует способность спектрального прибора пространственно разделять пучки лучей различных

длин волн. Дисперсия (угловая) определяется угловым расстоянием $\Delta\beta$ между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\Delta\lambda = 1\text{Å}$. Мерой угловой дисперсии является отношение $\Delta\beta/\Delta\lambda$.

Выражение для угловой дисперсии решетки легко получить, продифференцировав (16.1) по λ:

$$\frac{\Delta\beta}{\Delta\lambda} = \frac{k}{d\cos\beta}. \qquad (16.2)$$

Разрешающая способность характеризует способность спектрального прибора разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн. За меру разрешающей способности принимается отношение $\lambda/\delta\lambda$, где λ — длина волны, около которой производится измерение, а $\delta\lambda$ — разница в длинах волн двух разрешаемых спектральных линий. Величина $\delta\lambda$ определяется *условием Рэлея:* две близкие спектральные линии считаются разрешенными, если максимум одной из них совпадает с первым минимумом другой.

Из теории следует, что для дифракционной решетки разрешающая способность

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN, \qquad (16.3)$$

где k — порядок спектра, N — полное число действующих штрихов решетки.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа проводится на установке, состоящей из источника света и дифракционной решетки, установленной на гониометре—приборе, предназначенном для точных измерений углов.

Оптическая схема установки изображена на рис. 16-2. Источником света (*Осв*) является ртутная лампа, заключенная в защитный кожух, в окошке которого находится конденсорная линза. Далее свет проходит через коллиматор (*Кол*), в передней фокальной плоскости объектива которого находится узкая прямоугольная щель, и параллельным пучком падает на дифракционную решетку *Д*. Наблюдение дифрагированного света ведется с помощью зрительной трубы *Зр,* в фокальной плоскости объектива которой образуется спектр, состоящий из ряда ярких линий.

Внешний вид установки (без осветителя) показан на рис. 16-3. Здесь *1* — винт для регулировки ширины коллиматорной щели; *2* — коллиматор, жестко укрепленный на массивном основании; *3* — предметный столик, на котором установлена дифракционная решетка *4*; *5* — зрительная труба; *6* — барашек для перемещения окуляра *7*, в фокальной плос-

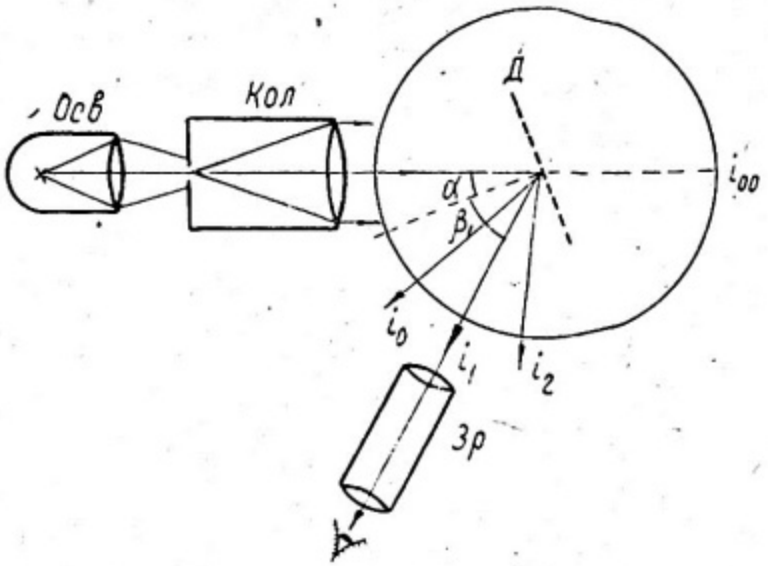

Рис. 16-2

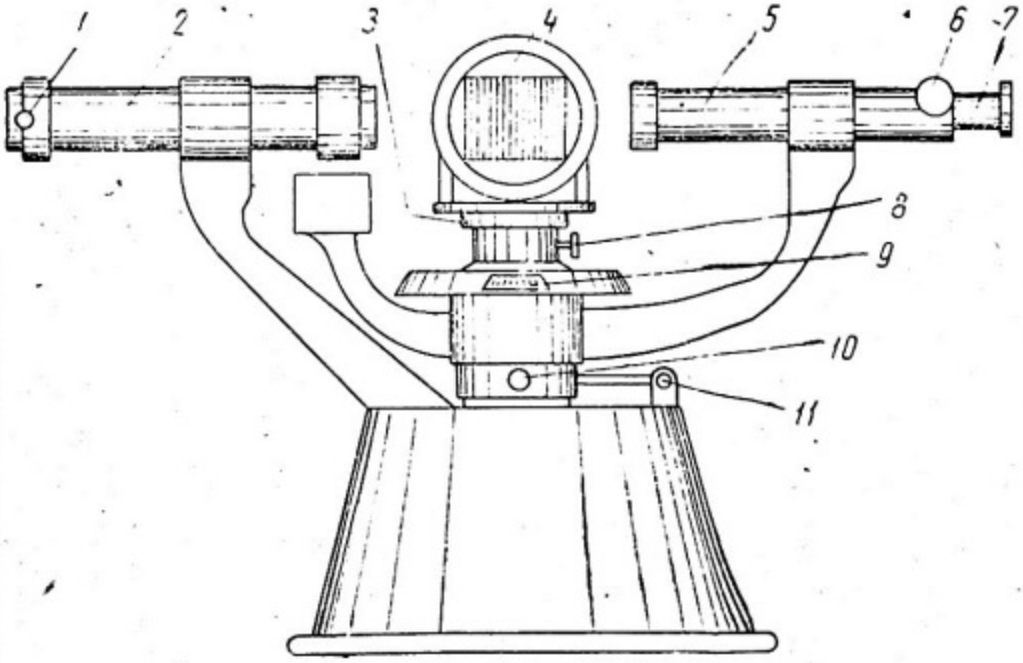

Рис. 16-3

кости которого находится визирный крест (два перпендикулярных штриха). Столик с решеткой может поворачиваться вокруг вертикальной оси после раскрепления стопорного винта *8*. Вокруг этой же оси может поворачиваться и зрительная труба. Закрепление трубы достигается винтом *10*, после чего винтом *11* можно осуществлять тонкое перемещение ее.

Положение трубы фиксируется через окошко *9* по шкале лимба, снабженного нониусом (цена деления шкалы лимба 0,5°, точность отсчета по нониусу 1′).

Для облегчения отсчета по нониусу служит специальная лупа с лампочкой для подсвета.

Задание

1. Измерение положения спектральных линий

Прежде всего следует определить направление пучка, выходящего из коллиматора. Для этого, освободив стопорный винт *8* (рис. 16-3), осторожно снять (вынуть) столик *3* с дифракционной решеткой. Подключить затем установку к внешней сети. Вращением ручки автотрансформатора увеличить напряжение до потенциала зажигания. Когда лампа зажжется, установить величину тока не более 2 *а*.

После этого расположить зрительную трубу навстречу пучку, выходящему из коллиматора. В поле зрения трубы должно появиться изображение коллиматорной щели. Вращением барашка *6* и винта *1* добиться получения четкого и узкого изображения щели, проследив одновременно за тем, чтобы отсутствовал параллакс между этим изображением и вертикальной визирной нитью. Закрепив трубу стопорным винтом *10*, произвести тонкую наводку винтом *11*, т. е. совместить вертикальную нить визирного креста с серединой линии. В этом положении снять отсчет i_{00} по нониусу. Данное измерение повторить не менее трех раз.

Затем зрительную трубу повернуть почти до соприкосновения с коллиматором, а столик с решеткой установить на место в положение, при котором в середине поля зрения трубы появится нулевой белый максимум (соответствующий зеркальному отражению). В этом положении столик закрепить стопорным винтом *8*.

Перемещая трубу вправо, просмотреть весь спектр — расположение и количество линий, а также число видимых порядков спектра. После этого можно приступить к измерениям.

Совмещая визирную нить последовательно с серединами всех спектральных линий (начиная с нулевого максимума), произвести соответствующие отсчеты по нониусу i_0, i_1, i_2, ...,

отмечая одновременно цвет каждой линии и порядок спектра, в котором она наблюдается. Полученные данные записать в табл. 16.1.

Таблица 16.1

№ п/п	Цвет линии	Порядок спектра k	Отсчет по нониусу i_k	Угол дифракции β_k	Постоянная решетки d

2. Обработка результатов измерений

Прежде всего рассчитать по полученным результатам угол падения α и угол дифракции β_k. Для этого следует воспользоваться формулами

$$\alpha = 90^\circ - \frac{i_0 - i_{00}}{2}, \quad \beta_k = \alpha + (i_0 - i_k), \tag{16.4}$$

которые не трудно получить с помощью рис. 16-2.

Зная длины волн желтых линий (5769,6 и 5790,7 Å) и их углы дифракции в первых двух порядках, вычислить по формуле (16.1) значения постоянной решетки. Из полученных результатов найти ее среднее значение.

Определив постоянную решетки, вычислить с помощью той же формулы (16.1) длины волн всех остальных видимых линий спектра.

Рассчитать по формуле (16.2) угловую дисперсию решетки для всех спектральных линий во втором порядке. По полученным результатам построить график зависимости угловой дисперсии от длины волны.

Зная ширину решетки (61 мм) и ее постоянную, вычислить по формуле (16.3) разрешающую способность решетки для максимального порядка спектра.

Работа 17

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА УЛЬТРАЗВУКЕ

ВВЕДЕНИЕ

Весьма интересным случаем дифракции является дифракция видимого света на ультразвуковых волнах в веществе. Экспериментально было обнаружено, что прозрачная жидкость, в которой распространяется ультразвуковая волна, ведет себя в оптическом отношении аналогично обыкновенной плоской штриховой решетки с периодом, равным длине ультразвуковой волны Λ. При освещении такой жидкости пучком параллельных лучей, перпендикулярных направлению распространения звуковой волны, кроме пучка прошедшего без отклонения, наблюдаются и дифрагированные пучки нескольких порядков.

Причина данного явления заключается в следующем. Жидкость, в которой распространяется ультразвуковая волна, представляет собой периодическую последовательность областей сжатия и разряжения, областей, которые характеризуются также и различием показателя преломления. При прохождении света через такую среду происходит изменение не амплитуды, а *фазы* световой волны, поэтому данная среда играет роль *фазовой решетки*.

В зависимости от различных условий в жидкости могут установиться или бегущие или стоячие звуковые волны, или те и другие одновременно. Важно то, что в любом случае возникающая фазовая решетка будет иметь один и тот же период, равной длине ультразвуковой волны Λ. Последнее иллюстрируется рис. 17-1, где густота точек соответствует распределению плотности жидкости в бегущей (*а*) и стоячей (*б*) ультразвуковых волнах.

Дифракцию света на ультразвуке можно наблюдать на установке, схематически изображенной на рис. 17-2. Здесь свет от источника C, преобразуемой коллиматорной линзой K

в пучок параллельных лучей, проходит через кювету с жидкостью *Ж*, в которой источник ультразвука *У* создает звуковую волну, направленную перпендикулярно световой волне. При прохождении через такую жидкость различные участки

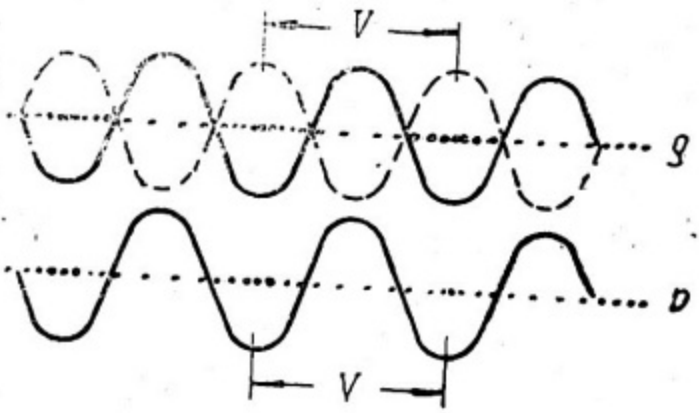

Рис. 17-1

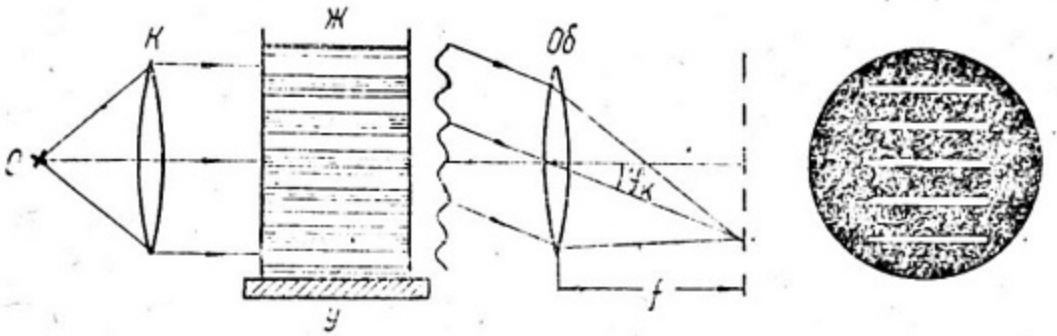

Рис. 17-2

фронта световой волны, сохраняя неизменной амплитуду, будут перемещаться с различной скоростью вследствие периодического характера изменения показателя преломления. В результате из жидкости выйдет световая волна, поверхность фронта которой будет уже не плоской, а как бы гофрированной. При наблюдении в параллельных лучах (фраунгоферова дифракция) в фокальной плоскости объектива *Об* обнаруживается дифракционный спектр, состоящий из ряда симметрично расположенных светлых максимумов (рис. 17-2, справа). При этом следует отметить, что возникающая дифракционная картина будет оставаться неподвижной как в случае бегущих, так и в случае стоячих ультразвуковых волн.

В простейшем случае, когда длина ультразвуковой волны Λ не очень мала, а амплитуда ее достаточно мала, дифракция света на ультразвуке, как показывает теория, вполне аналогична дифракции на обычной штриховой решетке с перио-

дом Λ. Для последней, как известно, положение максимумов определяется условием

$$d \sin \varphi_k = k\lambda, \qquad (17.1)$$

где d — период решетки, φ_k — угол дифракции, определяющий направление на дифракционный максимум k-го порядка ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$), λ — длина световой волны. В нашем случае $d = \Lambda$, т. е. в качестве периода решетки следует брать длину ультразвуковой волны Λ.

Используя явление дифракции света на ультразвуковой волне, можно легко определить длину волны Λ последней и затем, зная частоту ν, найти скорость распространения ультразвука v по формуле

$$v = \Lambda \cdot \nu. \qquad (17.2)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследование дифракции света на ультразвуке проводится на установке, состоящей из двух основных частей — ультразвуковой и оптической.

Источником ультразвуковых колебаний в данной работе служит пьезокварцевая пластинка, вырезанная определенным образом из кристалла кварца. Эта пластинка вместе с верхним электродом служит дном плоскопараллельной стеклянной кюветы *7* (рис. 17-3), в которую наливают исследуемую жидкость.

Кювету ставят дном (пьезокварцем) на специальную платформочку, являющуюся нижним электродом кварцевой пластинки. К обоим электродам подводится напряжение от высокочастотного генератора *УЗГ*, при этом кварц вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта будет испытывать механические деформации, знак и частота которых синхронны с частотой генератора. Колебания кварцевой пластинки будут иметь заметную амплитуду лишь в моменты резонанса, когда частота генератора совпадает с одной из собственных частот колебаний самой пластинки.

Частоту генератора можно плавно измерить в довольно широком мегагерцовом диапазоне вращением рукоятки с указателем. Рукоятка снабжена равномерной круговой шкалой, градуировочная кривая которой прилагается к установке.

Оптическая часть установки схематически представлена на том же рис. 17-3. Свет от осветителя *1*, снабженного конденсорной линзой, проходит съемный светофильтр *2* и освещает узкую прямоугольную щель *3*, находящуюся в передней фокальной плоскости коллиматорного объектива *4*. Пройдя последний, свет преобразуется в параллельный пучок лучей, которые затем проходят, отражаясь, через поворотную призму *5*,

исследуемую жидкость *7* и попадают в зрительную трубу. Дифракционную картину, возникающую в фокальной плоскости объектива *8* зрительной трубы, рассматривают через

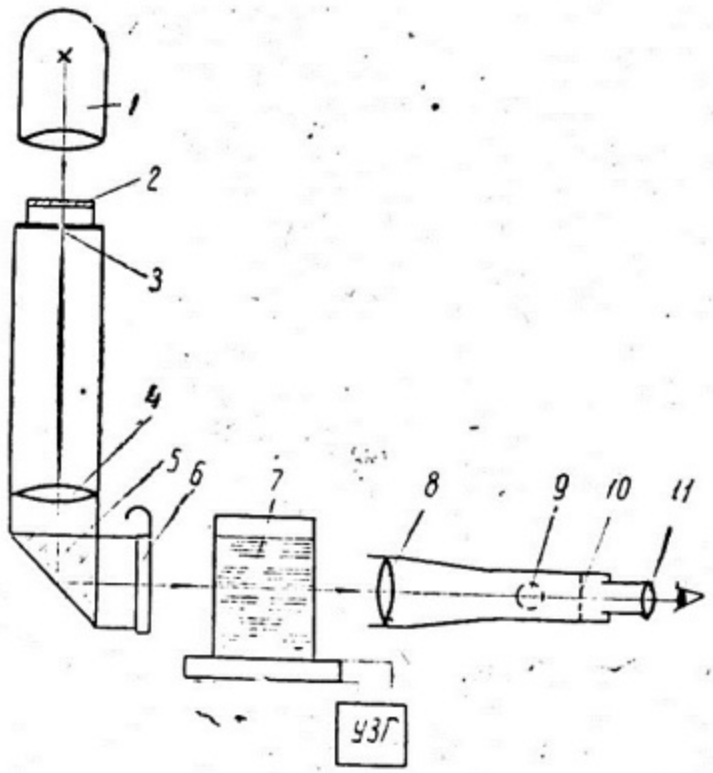

Рис. 17-3

окуляр *11*. Между объективом и окуляром зрительной трубы расположена неподвижная прозрачная шкала *10* (окулярная шкала). Вращением барашка *9* осуществляется перемещение объектива трубы вдоль ее оптической оси.

К установке прилагается обычная штриховая дифракционная решетка (с периодом 0,2 *мм*), служащая для определения цены деления окулярной шкалы. Эта решетка устанавливается в кассету *6*.

Задание

1. Определение цены деления окулярной шкалы

Прежде всего необходимо настроить оптическую часть установки. Для этого установить в рабочее положение кювету с исследуемой жидкостью, проследив за тем, чтобы при заливке жидкости на стенках кюветы не осталось пузырьков воздуха. Затем включить осветитель и, наблюдая в зрительную трубу, вращением накатанного кольца окуляра добиться четкого видения делений окулярной шкалы. После этого вращением барашка *9* (рис. 17-3) получить яркую узкую горизон-

тальную полосу — изображение коллиматорной щели (при необходимости ширину изображения можно изменить вращением специального винта, регулирующего ширину самой щели *3*).

Изображение щели при тщательной настройке должно совпадать с плоскостью окулярной шкалы, иначе будет иметь место параллакс — при легком покачивании окулярной насадки изображение щели начнет смещаться относительно делений окулярной шкалы. Параллакс легко устранить дополнительным поворотом барашка *9*.

Затем поместить в кассету *6* дифракционную решетку. В поле зрения окуляра зрительной трубы появится обычная дифракционная картина. Положение нулевого максимума легко определить: он имеет наибольшую яркость. После этого отсчитать по окулярной шкале положение всех видимых максимумов по обе стороны от нулевого. Результаты измерений записать. По формуле (17.1), зная постоянную решетки, порядок дифракционного максимума и длину волны, пропускаемую светофильтром ($\lambda = 0{,}63$ *мк*), вычислить значения углов φ_k для всех максимумов (ввиду малости углов в данной установке можно считать, что $\sin \varphi_k = \varphi_k$).

По полученным результатам найти цену деления окулярной шкалы в *рад/дел*. Для этого вычислить отношения найденных углов дифракции φ_k к соответствующему числу делений Δn_k окулярной шкалы:

$$\gamma = \frac{\varphi_k}{\Delta n_k}, \qquad (17.3)$$

где Δn_k — число делений окулярной шкалы между нулевым максимумом и максимумом k-го порядка. Из полученных значений γ найти среднее и его погрешность.

2. Определение скорости распространения ультразвука

Убрав дифракционную решетку, включить генератор ультразвуковых колебаний и дать ему несколько минут на прогрев. Затем, медленно поворачивая ручку регулятора частоты, добиться возникновения в поле зрения окуляра резкой дифракционной картины.

Записав соответствующую частоту генератора, по окулярной шкале определить положения всех дифракционных максимумов (в делениях шкалы).

Поворачивая далее рукоятку регулятора частоты, отыскать новый момент резонанса, т. е. следующую дифракционную картину, и провести те же измерения. Таким образом пройти весь диапазон частот генератора. Результаты измерений записать в таблицу.

Затем для каждой резонансной частоты генератора рассчитать длину ультразвуковой волны Λ. Расчетную формулу для определения Λ получим, комбинируя формулы (17.1) и (17.3):

$$\Lambda = \frac{k\lambda}{\gamma \cdot \Delta n_k},$$

где k — порядок дифракционного максимума, Δn_k — число делений окулярной шкалы между нулевым и k-м максимумом, γ — цена деления окулярной шкалы в *рад/дел.* (Здесь k и Δn_k, очевидно, относятся к дифракционной картине, возникающей от ультразвуковой решетки). Данный расчет рекомендуется провести для максимумов второго порядка (для большой точности).

По формуле (17.2) определить скорость ультразвука для всех резонансных частот генератора и вычислить ее среднее значение с указанием погрешности.

Работа 18

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТИВА ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

ВВЕДЕНИЕ

Прохождение света через оптические системы всегда сопровождается дифракцией световых волн от краев различного рода препятствий, имеющихся в каждой системе (диафрагмы, оправы линз и зеркал и др.). В результате этого явления стигматичность изображения нарушается: каждая точка объекта изображается уже не точкой, а дифракционным кружком. Последнее, очевидно, ограничивает возможность различения мельчайших деталей изображения и дает естественный предел для разрешающей способности всех оптических систем.

Наиболее простой характер дифракция света имеет в случае объектива, на который падает плоская световая волна от весьма удаленного точечного источника. Таким объективом является, например, объектив зрительной трубы.

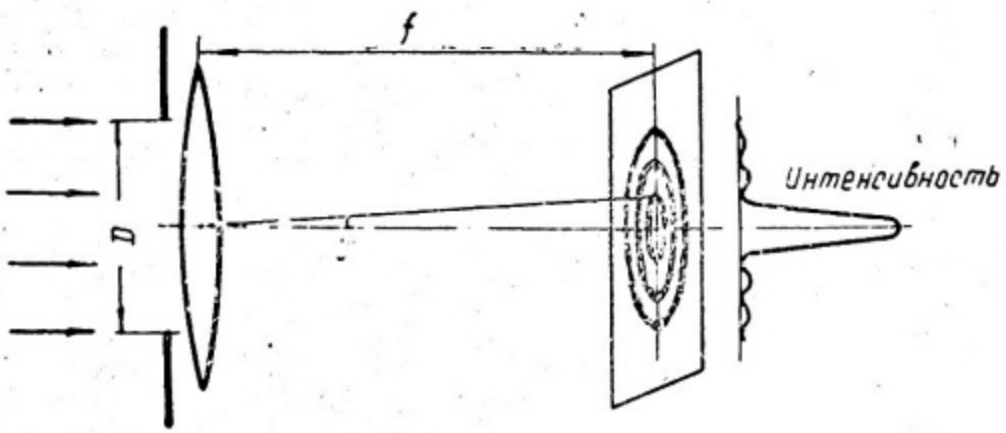

Рис. 18-1

Дифракция света от краев круглой оправы, ограничивающей отверстие объектива, приводит в этом случае к тому, что изображение точки получается в виде дифракционного кружка (рис. 18-1): центральный светлый максимум, интенсивность

которого быстро спадает, переходя, в темное кольцо, затем второй (слабый) кольцевой максимум и т. д.

Из теории следует, что угол дифракции φ, соответствующий радиусу *первого* темного кольца, определяется следующим условием:

$$D \sin \varphi = 1{,}22\ \lambda, \qquad (18.1)$$

где D — диаметр отверстия объектива, λ — длина волны.

Пусть теперь объектив трубы направлен на два удаленных точечных некогерентных источника S_1 и S_2, разделенных угловым расстоянием ψ. В этом случае изображение источников будет представлять собой просто наложение светлых и темных колец обоих дифракционных кружков (рис. 18-2). Если центры кружков достаточно близки, а радиусы их значитель-

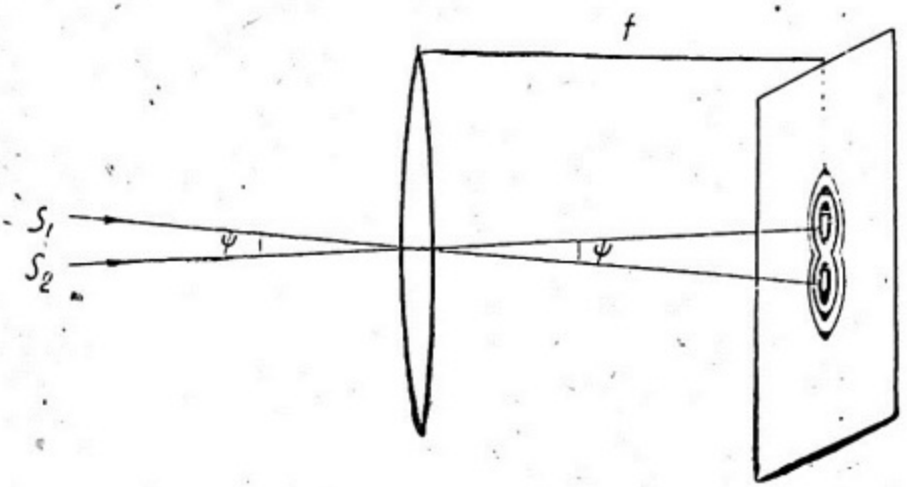

Рис. 18-2

ны, то получающаяся картина может не дать впечатления двух раздельных изображений — объектив не в состоянии разрешить две светящиеся точки.

Условно принято считать, что пределом разрешения дифракционных изображений двух точек является такое положение, при котором первое темное кольцо одного дифракционного источника проходит через центр другого кружка (*условие Рэлея*). При этом величина «провала» на результирующей кривой распределения интенсивностей (рис. 18-2) составляет около 20% от ординаты максимумов, и глаз уверенно может различить оба изображения.

Таким образом, при выполнении условия Рэлея угловой радиус φ первого темного кольца равен угловому расстоянию ψ между источниками S_1 и S_2. Угол ψ, равный углу φ, но-

сит название *предельного угла* $\psi_{пред}$. Учитывая малость угла $\psi_{пред}$, на основании формулы (18.1) можно написать

$$\psi_{пред} = \frac{1{,}22\lambda}{D}. \qquad (18.2)$$

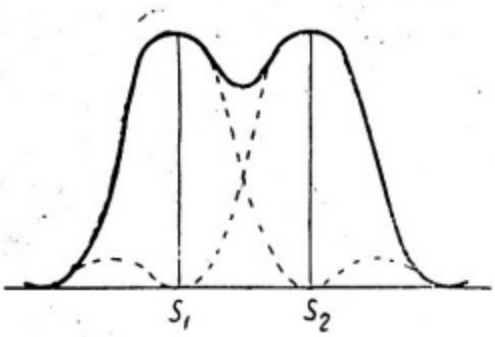

Рис. 18-3

Величина, обратная предельному углу, называется *разрешающей силой:*

$$A = \frac{1}{\psi_{пред}} = \frac{D}{1{,}22\lambda}. \qquad (18,3)$$

Отсюда виден характер зависимости разрешающей силы объектива от диаметра его отверстия D и длины световой волны λ.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для получения изображения в фокальной плоскости объектива зрительной трубы точечные источники света должны быть удалены от нее на бесконечность. В условиях лаборатории это достигается помещением исследуемых источников в фокальную плоскость коллиматора. Кроме того, для исследования разрешающей способности расстояние между источниками должно быть достаточно малым — соответствовать предельному углу $\psi_{пред}$.

Эти требования положены в основу конструкции используемой в данной работе установке, оптическая схема которой представлена на рис. 18-4.

Здесь *Осв* — осветитель (ртутная лампа с конденсорной линзой); *И* — диафрагма с набором малых отверстий, расположенных на разных расстояниях друг от друга и служащих точечными источниками; *О* — вспомогательный объектив, проектирующий отверстия диафрагмы *И* в фокальную плоскость коллиматора *Кол* и уменьшающий расстояния между источниками до значения близкого к пределу разрешения трубы: *Зр* — зрительная труба, перед которой расположен диск *Д* с набором круглых отверстий различных диаметров.

Для определения расстояния между отверстиями диафрагмы *И* служит отсчетный микроскоп *М*, снабженный окулярной шкалой. Цена деления последней находится с помощью

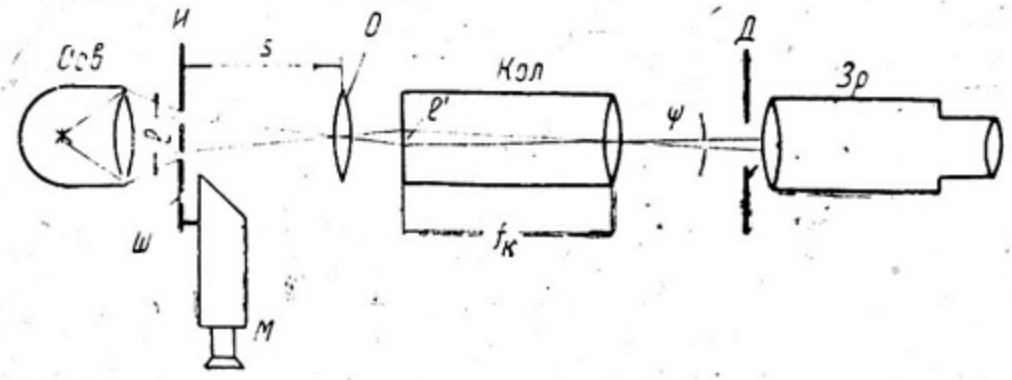

Рис. 18-4

объектной шкалы *Ш*, цена деления которой 0,1 *мм*. Микроскоп может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, параллельной оси установки.

К установке прилагается набор светофильтров, одеваемых на окуляр зрительной трубы: фиолетовый (0,42 *мк*), зеленый (0,52 *мк*) и красный (0,72 *мк*).

Задание

1. Подготовка установки к опыту

Подключить установку к внешней сети. Вращением ручки автотрансформатора увеличить напряжение на ртутной лампе до потенциала зажигания. Когда лампа зажжется, отрегулировать величину тока не более 4 *а*.

Определить цену деления окулярной шкалы микроскопа *М* (рис. 18-4): опустить на объектную шкалу молочное стекло (для уменьшения яркости) и, сфокусировав микроскоп на шкалу, подсчитать число делений окулярной шкалы, совпадающее с определенным числом делений объектной шкалы. Зная цену деления объектной шкалы, вычислить цену деления окулярной шкалы. Измерения повторить не менее трех раз.

Затем настроить зрительную трубу на бесконечность. Для этого снять диафрагму *И* с отверстиями и оставшуюся вертикальную щель закрыть молочным стеклом. Поворотом диска *Д* установить перед объективом зрительной трубы отверстие с максимальным диаметром. Вращением окуляра трубы добиться отчетливого изображения вертикальной щели.

После этого установить диафрагму *И* и ввести в ход лучей одиночное отверстие. В поле зрения окуляра должна возникнуть четкая дифракционная картина со светлым центром и не менее, чем тремя светлыми кольцами.

Убедиться, что введение в ход лучей все меньших отверстий диафрагмы *Д* приводит к увеличению дифракционной картины.

2. Определение зависимости разрешающей способности от диаметра объектива и длины световой волны

В данной работе определение разрешающей способности объектива зрительной трубы при различных условиях сводится к нахождению соответствующих расстояний l между отверстиями диафрагмы *И* (рис. 18-4), при которых в фокальной плоскости объектива трубы дифракционная картина будет отвечать условию Рэлея. При этом расчетная формула для разрешающей силы объектива трубы имеет следующий вид*:

$$A = \frac{1}{\psi_{\text{пред}}} = \frac{s - f_0}{l} \cdot \frac{f_k}{f_0}, \qquad (18.4)$$

где s — расстояние от диафрагмы *И* до центра объектива *О*, f_0 — фокусное расстояние объектива *О*, f_k — фокусное расстояние коллиматорного объектива (значение s, f_0 и f_k указаны на установке).

Измерения проводятся в следующем порядке (сначала без светофильтра).

Установить максимальное отверстие диафрагмы *Д*. Медленно перемещая затем диафрагму *И*, найти такую пару отверстий, дифракционное изображение которых отвечало бы их разрешению *в согласии с условием Рэлея*. Измерить микроскопом соответствующее расстояние l между центрами действующих отверстий. Измерение провести не менее трех раз при независимых настройках на разрешение.

Аналогичные измерения провести последовательно для всех отверстий диафрагмы *Д*.

Записав полученные результаты в таблицу, рассчитать по формуле (18.4) значения разрешающей силы A для всех диаметров D отверстий диафрагмы *Д*.

---

* Из схемы установки (рис. 18.4) видно, что угловое расстояние $\psi_{\text{пред}}$ между точечными источниками, расположенными в фокальной плоскости коллиматорного объектива, равно $\psi_{\text{пред}} = l'/f_k$. Расстояние l' не трудно выразить через расстояние l между отверстиями диафрагмы *И*. Используя формулу тонкой линзы, находим $l' = l\frac{f_0}{s - f_0}$. Исключение l' из этих двух формул приводит к выражению (18.4).

Затем провести те же измерения для каждого из имеющихся светофильтров.

По результатам расчетов построить на миллиметровой бумаге график зависимости разрешающей силы от диаметра отверстия диафрагмы $Д$ (для белого света и со светофильтрами). На том же чертеже построить для сравнения теоретический график зависимости для одной из длин волн, воспользовавшись непосредственно формулой (18.3).

Работа 19

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

ВВЕДЕНИЕ

Из электромагнитной теории света непосредственно следует, что световая волна поперечна, т. е. три вектора, характеризующие волну (электрический $\boldsymbol{E}$, магнитный $\boldsymbol{H}$ и скорость распространения v), взаимно перпендикулярны, образуя правовинтовую систему.

Свет со всевозможными ориентациями вектора $\boldsymbol{E}$ (а следовательно и $\boldsymbol{H}$) принято называть *естественным,* а свет, в котором вектор $\boldsymbol{E}$ имеет одно единственное направление — *плоско-поляризованным.*

В случае плоско-поляризованного света, плоскость, в которой расположен электрический вектор $\boldsymbol{E}$, называют плоскостью колебания светового вектора, а плоскость, в которой расположен вектор $\boldsymbol{H}$ — плоскостью поляризации.

Получение плоско-поляризованного света обычно осуществляют при отражении света от поверхности диэлектрика или при прохождении его через прозрачные анизотронные среды (например, кристаллы).

I. При отражении от поверхности диэлектрика свет поляризуется, частично или полностью, в зависимости от угла падения. Для каждого изотропного диэлектрика существует определенное значение угла падения i_0 (*угол Брюстера*), связанного с показателем преломления n формулой

$$\operatorname{tg} i_0 = n, \qquad (19.1)$$

при котором отраженный свет будет полностью поляризован. При этом плоскость колебания светового вектора оказывается перпендикулярной плоскости падения.

Последнее можно объяснить следующим образом. Когда угол падения равен углу Брюстера, то отраженный луч будет перпендикулярен преломленному лучу (рис. 19-1). В этом не трудно убедиться, исходя из условия (19.1). С другой стороны, колебания вторичных излучателей изотропного диэлектрика

происходят в направлениях, перпендикулярных направлению распространения *преломленного* луча. А так как отраженный луч перпендикулярен преломленному, то колебания светового вектора вторичных волн, дающих *отраженный* луч, будут происходить в плоскости, также перпендикулярной преломленному лучу.

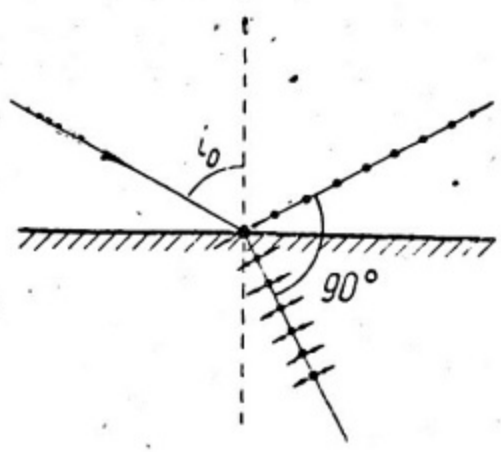

Рис. 19-1

Для реальных поверхностей, благодаря наличию поверхностных пленок и шероховатостей, полной поляризации достигнуть трудно.

II. Поляризация света при прохождении через прозрачные анизотронные среды, связана с явлением *двойного лучепреломления,* сущность которого заключается в следующем. Световой пучок, входящий в кристалл в общем случае разделяется на два пучка (рис. 19-2) — обыкновенный (o) и необыкновенный (e).

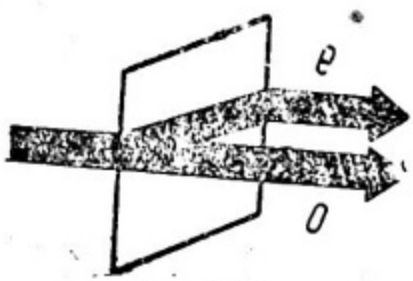

Рис. 19-2

В таких кристаллах, как исландский шпат, кварц и др., существует одно определенное направление, вдоль которого разделение пучка не происходит. Это направление принято называть *оптической осью* кристалла, а плоскость, проходящую через оптическую ось и световой луч, — *главным сечением,* или *главной плоскостью* кристалла.

Оказывается, что оба световых пучка (обыкновенный *о* и необыкновенный *е*), возникающие при двойном лучепреломлении, плоско-поляризованы. Причем колебания светового вектора в обыкновенном пучке перпендикулярны плоскости главного сечения кристалла, соответствующей пучку *о*, а в необыкновенном — совпадают с плоскостью главного сечения, соответствующей пучку *е*. Так как в большинстве случаев угол между главными сечениями обыкновенного и необыкновенного пучков мал, то можно считать, что плоскости колебаний светового вектора в обоих пучках почти перпендикулярны друг другу.

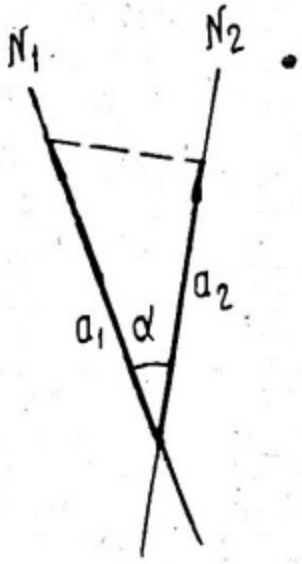

Рис. 19-3

Отличить естественный свет от поляризованного и определить направление световых колебаний в нем можно при помощи различных анализаторов: поляроидной пленки, призмы Николя и отражением от поверхности диэлектрика.

Если естественный свет проходит последовательно через два поляризатора, главные плоскости которых N_1 и N_2 (рис. 19-3) образуют между собой угол α, то интенсивность прошедшего света будет пропорциональна $\cos^2\alpha$. Действительно, пусть a_1 — амплитуда плоско-поляризованного света, прошедшего через поляризатор N_1. Тогда амплитуда света, прошедшего через поляризатор N_2, как видно из рис. 19-3, $a_2 = a_1 \cos\alpha$. Так как интенсивность света I пропорциональна квадрату амплитуды, то

$$I_2 = I_1 \cos^2\alpha. \qquad (19.2)$$

Это соотношение выражает собой *закон Малюса*.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка данной работы собрана на основе обычного гониометра — прибора для точных измерений углов.

Оптическая схема прибора показана на рис. 19-4. Свет от осветителя *Осв* конденсорной линзой концентрируется на отверстии диафрагмы *Д*, находящейся в передней фокальной плоскости коллиматорного объектива *Кл*. Вышедший из коллиматора параллельный пучок света, отразившись от исследуемого объекта *О*, попадает в зрительную трубу, давая в фокальной плоскости объектива *Об* изображение отверстия диафрагмы *Д*. Изображение рассматривается через окуляр *Ок* (или боковой патрубок *Б* с помощью полупрозрачной пла-

стины *П*). В фокальной плоскости объектива *Об* расположен визирный крест *К*.

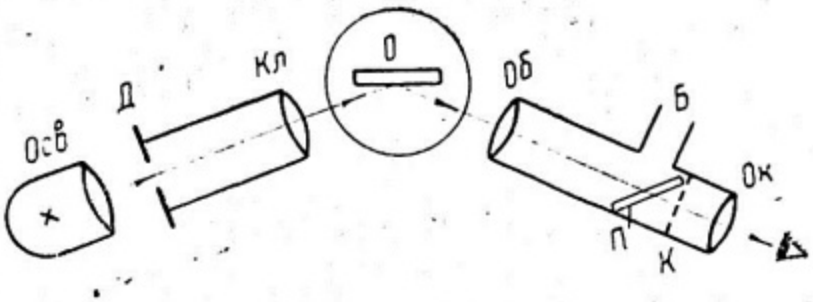

Рис. 19-4

Внешний вид прибора изображен на рис. 19-5. Здесь *1* — осветитель, *2* — шторка с двумя круглыми отверстиями разных диаметров, *3* — коллиматор, *4* — предметный столик, на который помещают исследуемый объект, *5* — зрительная

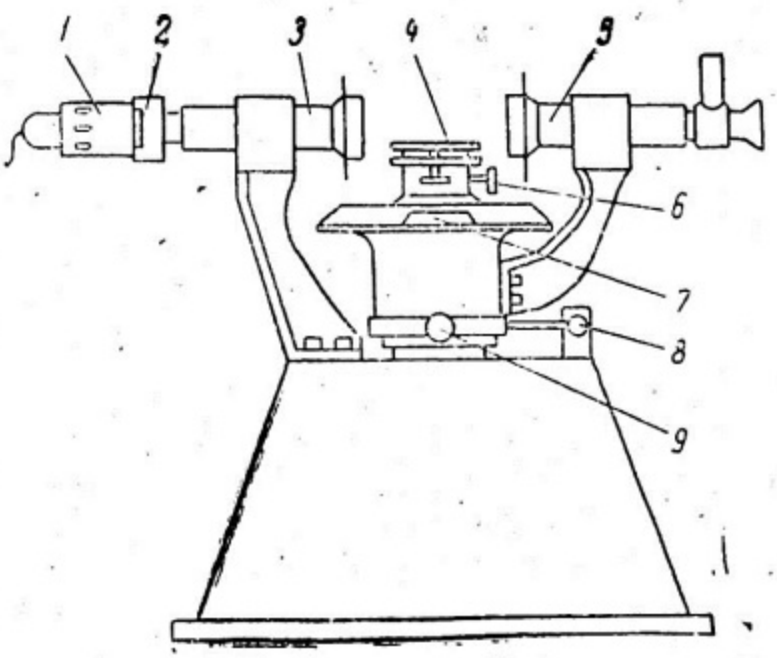

Рис. 19-5

труба. Как столик, так и зрительную трубу можно поворачивать независимо друг от друга вокруг вертикальной оси прибора. Закрепление столика в определенном положении осуществляется винтом *6*, зрительной трубы — винтом *9*. При закрепленном винте *9* вращением винта *8* осуществляется тонкое перемещение трубы. Положение зрительной трубы отсчи-

тывается через окошко 7 по нониусу. Цена деления шкалы лимба 0,5°, точность отсчета по нониусу 1′.

Для обличения отсчетов по нониусу служит специальная лупа с лампочкой для подсвета.

К установке прилагаются: гальванометр с фотоэлементом, поляризационные насадки (с полярoидными пленками и призмой Николя), кристалл исландского шпата и диэлектрик (в специальных оправах).

Задание

1. Определение показателя преломления диэлектрика по углу Брюстера

Включив осветитель, перемещением шторки 2 (рис. 19-5) ввести в ход лучей отверстие меньшего диаметра. Зрительную трубу повернуть навстречу пучку, выходящему из коллиматора. Глядя в окуляр трубы, совместить вертикальный штрих визирного креста с центром светового пятна, после чего сделать отсчет α_0 по нониусу.

Затем установить на предметный столик исследуемый диэлектрик и, поворачивая столик и зрительную трубу, добиться появления в центре поля зрения светового пятна. На объектив зрительной трубы надеть насадку с призмой Николя и, вращая ее вокруг оптической оси трубы, получить наибольшее затемнение светового пятна. Меняя угол падения светового пучка на поверхность диэлектрика (вращением столика) и ведя одновременно зрительную трубу за световым пятном, найти положение, соответствующее максимальному затемнению пятна. Эту операцию повторить не менее семи раз, беря каждый раз отсчеты α_i по нониусу.

Найдя среднее значение $\bar{\alpha}$, вычислить угол Брюстера по формуле

$$i_0 = 90° - \frac{\alpha_0 - \bar{\alpha}}{2},$$

и показатель преломления n из соотношения (19.1).

2. Наблюдение двойного лучепреломления в кристалле исландского шпата

Сняв с предметного столика диэлектрик, надеть на объектив коллиматора насадку с кристаллом исландского шпата. Ось зрительной трубы совместить с осью коллиматора. Надеть на объектив зрительной трубы насадку с анализатором и дополнительной линзой *.

---

* Дополнительная линза служит для рассматривания задней поверхности кристалла.

При этом в поле зрения трубы должны наблюдаться два световых пятна.

Вращая кристалл исландского шпата вокруг оптической оси, определить, какой из двух пучков обыкновенный и какой необыкновенный. Объяснить, почему при вращении кристалла периодически меняется интенсивность обоих пучков.

3. Проверка закона Малюса

Установить в фокальной плоскости коллиматора бо́льшее отверстие. Надеть на объектив коллиматора и объектив зрительной трубы насадки с поляроидными пленками. Ось трубы направить по оси коллиматора путем совмещения центра визирного креста с центром светового пятна. Вращая поляризатор, убедиться, что интенсивность пятна периодически меняется.

Надев на окуляр зрительной трубы насадку с фотоэлементом, установить исходное положение поляризатора по максимальному отклонению зайчика гальванометра. Поворачивая затем поляризатор (от 0 до 360°), через каждые 30° записать отсчеты по шкале гальванометра. Эти отсчеты отвечают интенсивности света (в единицах фототока), прошедшего через поляризатор и анализатор.

Затем, сняв анализатор, промерить интенсивность света I_1, прошедшего через поляризатор (также в единицах фототока).

По найденному значению I_1 построить согласно формуле (19.2) график теоретической зависимости интенсивности света I (в единицах фототока) от угла α. На этом же графике нанести точки, соответствующие данным, полученным в результате непосредственного фотометрирования. Дать объяснение возможных расхождений.

Работа 20

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

ВВЕДЕНИЕ*

Известно, что прозрачное изотропное вещество, подвергнутое одностороннему сжатию или растяжению, становится в оптическом отношении эквивалентным одноосному кристаллу, оптическая ось которого совпадает с направлением действия внешних сил. При этом наблюдается явление *двойного лучепреломления,* характерное для анизотропных веществ: свет, распространяясь в деформированной среде, разлагается на две составляющих — обыкновенный и необыкновенный лучи, — которые линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях и распространяются в общем случае с различными скоростями.

Это явление проще всего наблюдать с помощью схемы, в которой используется *интерференция поляризованных лучей* (рис. 20-1,*а*). Исследуемый образец A помещают между поляризатором N_1 и анализатором N_2. Если поляризатор и анализатор скрещены между собой, т. е. их главные плоскости составляют между собой угол 90°, то при отсутствии деформаций в образце свет, прошедший через поляризатор N_1, практически полностью задерживается анализатором N_2. Если теперь образец подвергнуть сжатию вдоль оси OO' составляющей некоторый угол α (отличный от 0 и 90°) с направлением одной из главных плоскостей (N_1 или N_2), то линейно поляризованный свет испытает в образце двойное лучепреломление, в результате чего произойдет просветление поля в анализаторе N_2.

Сказанное поясняет рис. 20-1,*б*. Здесь a_1 — амплитуда колебаний линейно поляризованного света, прошедшего через поляризатор N_1; a_o и a_e — амплитуды колебаний обыкновен-

* Предварительно следует ознакомиться с введением к работе 19.

ного и необыкновенного лучей в образце. Анализатор N_2 сводит оба колебания к одной плоскости (амплитуды a_{2o} и a_{2e}), причем легко видеть, что $a_{2o} = a_{2e}$ при любых значениях угла α. Оба колебания возникают из одного линейно поляризованного колебания a_1, поэтому они *когерентны* и могут интерферировать. Отчетливее всего результат интерференции наблюдается при значении угла α в 45°, так как в этом случае амплитуды обеих колебаний (a_{2o} и a_{2e}) достигают максимальной величины.

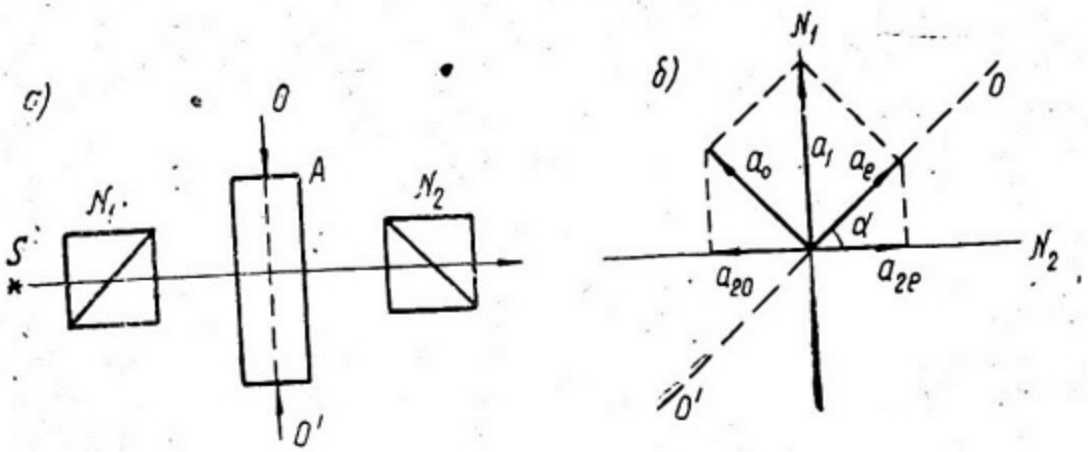

Рис. 20-1

В образце оба рассматриваемых колебания имеют разные скорости, поэтому для них различны и показатели преломления n_o и n_e. В результате после прохождения образца и анализатора N_2 между данными колебаниями возникает разность фаз δ:

$$\delta = 2\pi \frac{d(n_o - n_e)}{\lambda} + \pi, \qquad (20.1)$$

где d — толщина образца, λ — длина волны света. Здесь первый член справа обусловлен оптической разностью хода в самом образце $d(n_o - n_e)$; добавочная же разность фаз π* возникает ввиду того, что векторы a_{2o} и a_{2e} направлены в противоположные стороны (при скрещенных поляризаторе и анализаторе).

Амплитуда a результирующего колебания, возникающего вследствие интерференции колебаний с амплитудами a_{2o} и a_{2e}, а следовательно и интенсивность света I ($I \sim a^2$), будет зависеть от величины разности фаз δ, достигая максимума, когда оба колебания находятся в фазе ($\delta = \pm 2k\pi$, $k = 0, 1, 2, \ldots$), и минимума, когда колебания в противофазе [$\delta = \pm(2k+1)\pi$, $k = 0, 1, 2, \ldots$].

---

* Это означает, что при $d \ll \lambda$ разность фаз δ мало отличается от π.

Опыт показывает, что в области упругих деформаций оптическая разность хода в образце зависит линейно от давления p, испытываемого образцом при сжатии, и толщины d образца:

$$d(n_o - n_e) = Cpd, \qquad (20.2)$$

где C — так называемый *коэффициент фотоупругости*, характеризующий оптические свойства деформированного вещества и зависящий от длины волны света. Этот коэффициент обычно измеряется в *брюстерах* (1 *брюстер* $= 10^{-13}$ *см*^{2}*/дин*).

Определение коэффициента фотоупругости, как видно из формулы (20.2), в основном сводится к измерению оптической разности хода $d(n_o - n_e)$. Для этой цели используется кварцевый клин (рис. 20-2), представляющий собой пластинку из кристаллического кварца в форме клина с углом порядка 10″.

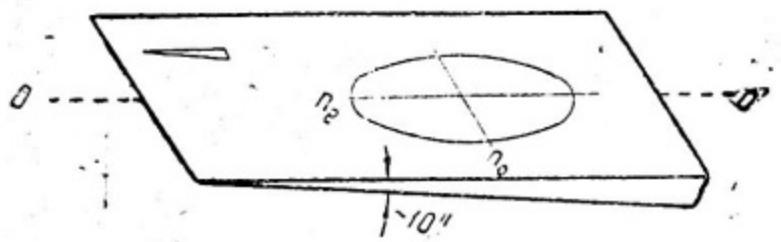

Рис. 20-2

Оптическая ось клина OO' направлена перпендикулярно его ребру. Сам клин очень тонок, поэтому для прочности его заклеивают между двумя стеклами в металлической оправе.

Если этот клин поместить между скрещенными поляризатором и анализатором, то можно наблюдать систему интерференционных полос, параллельных ребру клина. Интерференционные полосы образуются вследствие того, что разность хода $d'(n'_o - n'_e)$, возникающая в клине, будет изменяться вдоль клина вместе с его толщиной d', давая последовательно интерференционные максимумы и минимумы. Переход от одного интерференционного максимума к соседнему соответствует изменению оптической разности хода лучей в клине на целую длину волны λ. Следовательно, расстоянию между соседними максимумами (или минимумами), называемому шириной интерференционной полосы, соответствует разность хода, равная λ.

Если поместить кварцевый клин между образцом и анализатором в схеме рис. 20-1,*а* и подвергнуть образец сжатию, то обнаруживается смещение всех полос, обусловленное возникновением дополнительной разности хода в самом образце. При этом все полосы смещаются на одинаковую величину к ребру клина или от него в зависимости от характера разности хода в образце. Смещение полос на долю x от расстояния между

соседними максимумами (или минимумами) будет соответствовать изменению разности хода на величину $x\lambda$. Таким образом, измеряя величину относительного смещения полос x и зная длину волны λ, можно определить разность хода в образце $[d(n_o - n_e) = x\lambda]$ и по формуле (20.2) коэффициент фотоупругости C:

$$C = \frac{\lambda x}{d \cdot p}. \qquad (20.3)$$

Для *определенной* интерференционной полосы полная разность хода (образец + кварцевый клин), очевидно, должна оставаться постоянной при смещении этой полосы, т. е.

$$d(n_0 - n_e) + d'(n'_0 - n'_e) = \text{const}. \qquad (20.4)$$

Отсюда, зная характер изменения толщины клина в направлении смещения полос (d' увеличивается или уменьшается) и знак разности $n'_o - n'_e$, не трудно определить знак первого члена, т. е. установить какой из показателей преломления образца (n_o или n_e) больше.

Изложенные выше соображения лежат в основе широко применяемого в настоящее время *метода фотоупругости*, который состоит в том, что из прозрачных изотропных материалов (например, плексигласа) изготовляют модели различных непрозрачных деталей и исследуют их описанным методом. Это позволяет решать ряд важных вопросов, связанных с наличием и распределением деформаций и напряжений в моделируемых деталях.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка, применяемая в данной работе, состоит из двух основных частей — оптической и нагрузочной.

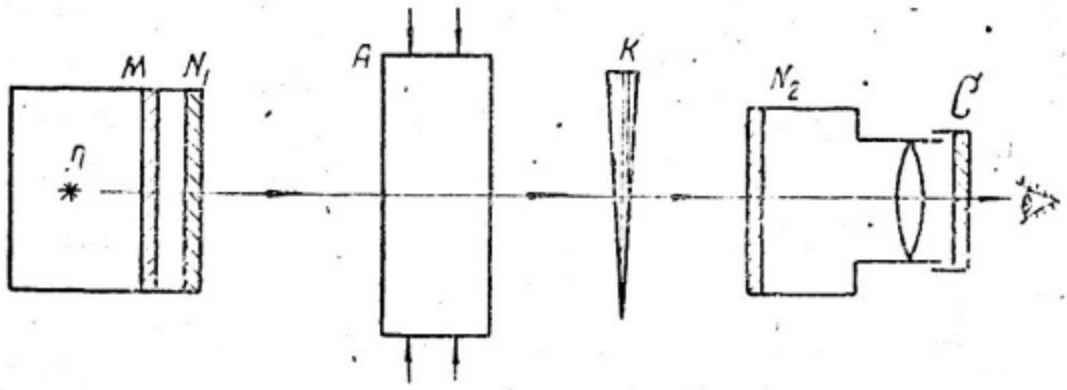

Рис. 20-3

Оптическая схема установки показана на рис. 20-3. Свет от лампы $Л$, рассеянный матовой пластинкой M, проходит через поляризатор N_1 — поляроидную пленку, главная

плоскость которой составляет угол 45° с вертикальной осью образца, — затем через образец A, напряжение в котором создается в вертикальном направлении, и, наконец, попадает в визирную трубку, содержащую анализатор N_2 и светофильтр C. Анализатор представляет собой также поляроидную пленку, главная плоскость которой в рабочем положении должна составлять угол 90° с главной плоскостью поляризатора.

Между образцом и анализатором может быть введен кварцевый клин K и отсчетная шкала.

Нагрузочное устройство — пресс — представляет собой рычаг второго рода, с отношением плеч 1 : 10. Нагрузка прикладывается к концу рычага, который снабжен специальным подвесом для гирь с указанным на них весом.

Задание

1. Подготовка установки к измерениям

Ознакомившись с установкой, включить осветитель, вывести светофильтр и кварцевый клин из хода лучей и скрестить поляризатор с анализатором путем вращения оправы анализатора до полного затемнения поля. Установить образец в вертикальном положении под ненагруженный пресс (поверхность образца должна быть перпендикулярной лучу зрения).

Тщательно просмотреть образец, отмечая наличие или отсутствие остаточных напряжений (по наличию окрасок). Затем, постепенно нагружая рычаг пресса, проследить по характеру возникновения окрасок за распределением напряжений по образцу. Если поверхность образца однородна по цвету, то образец установлен правильно, и напряжения распределены по его сечению равномерно. Наличие неравномерных и неоднотонных окрасок свидетельствует о том, что образец установлен плохо: напряжения распределены по его сечению неравномерно. В этом случае, сняв нагрузку, вновь установить образец, пользуясь специальными прокладками. Если при последующем сжатии образца возникающие окраски будут однотонны (за исключением, может быть торцов образца), то подготовку установки можно считать законченной.

После этого ввести в ход лучей светофильтр и кварцевый клин (клин K должен наполовину перекрываться образцом, как показано на рис. 20-4) и, постепенно разгружая рычаг, проследить за характером смещения полос на одной стороне клина относительно другой. Сняв нагрузку полностью, можно приступить к измерениям.

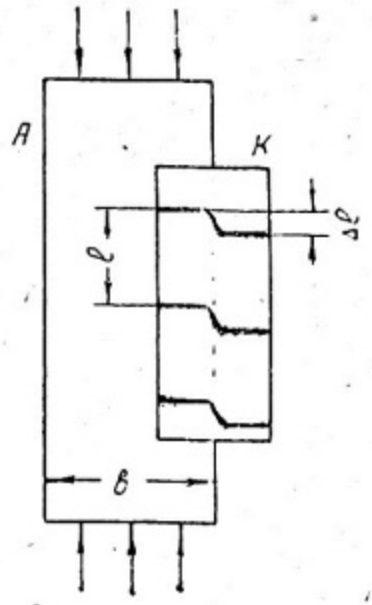

Рис. 20-4

2. Определение зависимости смещения полос от нагрузки

Прежде всего необходимо не менее трех раз измерить ширину l самой полосы, т. е. расстояние между серединами соседних темных полос (в делениях шкалы).

Затем, постепенно нагружая рычаг, произвести измерения (также в делениях шкалы) величины смещения полос Δl (рис. 20-4) при различных нагрузках P. Отметить одновременно направление смещения полос (вверх или вниз). Измерения провести при всех значениях нагрузок, повторив опыт не менее трех раз.

Полученные данные (l, P, Δl и $x = \Delta l/l$) записать в таблицу.

Построить затем график зависимости относительного смещения x от нагрузки P. Из графика найти среднее значение отношения x/P.

3. Определение коэффициента фотоупругости

Можно показать*, что расчетная формула для определе-

* Из формулы рычага с заданным отношением плеч (1 : 10) не трудно выразить давление p через нагрузку P:

$$p = \frac{bd}{10} P,$$

где b и d — соответственно ширина и толщина образца. Подставив это выражение в формулу (20.3), получим формулу (20.5).

ния коэффициента фотоупругости C имеет в нашем случае следующий вид:

$$C = \frac{\lambda b}{10} \cdot \frac{x}{P}, \qquad (20.5)$$

где λ — длина волны используемого светофильтра (0,55 *мк*), b — *ширина* образца (рис. 20-4).

Измерив штангенциркулем ширину образца b (в нескольких местах) и воспользовавшись найденным выше средним значением отношения x/P, вычислить по формуле (20.5) коэффициент фотоупругости C, выразив его в *брюстерах*.

По направлению смещения полос определить с помощью формулы (20.4), какой из показателей преломления образца (n_o или n_e) больше, если известно, что для кварцевого клина $n_o' < n_e'$ и что толщина клина увеличивается кверху.

Работа 21

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что свет при прохождении через кристаллы в направлении оптической оси распространяется без двойного лучепреломления. Однако в некоторых кристаллах (например, киноварь, кварц) распространение плоскополяризованного света вдоль оптической оси сопровождается поворотом плоскости поляризации. Это явление было обнаружено и в некоторых органических жидкостях (растворах сахара, скипидара, винной кислоты) и получило название явления *естественного вращения плоскости поляризации.*

Вещества, вращающие плоскость поляризации, называются *оптически активными.*

Для оптически активных растворов угол поворота φ плоскости поляризации оказывается пропорциональным толщине l проходимого светом слоя и концентрации раствора c:

$$\varphi = [\alpha]\, cl \qquad (21.1)$$

где $[\alpha]$—коэффициент, называемый удельным вращением плоскости поляризации и численно равный углу ее поворота *в град.* при $c = 1$ *г/см*^{3} и $l = 1$ *дм*. Коэффициент $[\alpha]$ зависит от длины световой волны, температуры и природы вещества.

Вращение плоскости поляризации оптически активным веществом можно наблюдать, поместив это вещество между двумя скрещенными николями N_1 и N_2 (рис. 21-1), главные плоскости которых взаимно перпендикулярны. В этом случае поле зрения, темное в отсутствии оптически активного вещества, просветлеет после введения данного вещества вследствие поворота плоскости поляризации. Повернув никель N_2 вокруг оптической оси в такое положение, при котором поле зрения станет опять темным, можно тем самым одновременно найти и угол поворота плоскости поляризации φ.

Однако определение угла φ таким способом сопряжено со значительными погрешностями, ибо визуально трудно найти положение николя N_2, отвечающее *максимальному* затемнению поля зрения. Поэтому на практике обычно применяется так называемый *полутеневой метод,* основанный на *сравнении* яркостей двух полей, что в силу физиологических особенностей глаза дает более высокую точность определения угла φ.

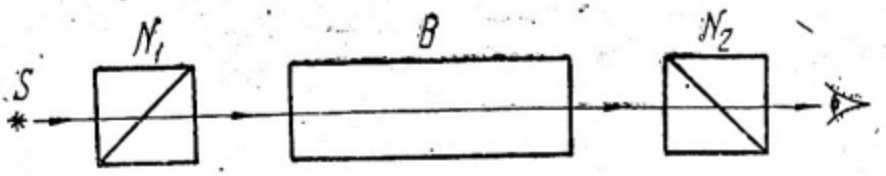

Рис. 21-1

Сущность полутеневого метода состоит в следующем. Поляризатор N_1 в схеме рис. 21-1 делается таким (см. ниже), что проходящий через него свет расчленяется на два одинаковых по интенсивности линейно поляризованные пучка, плоскости поляризации которых N_1' и N_1'' составляют между собой небольшой угол α (рис. 21-2).

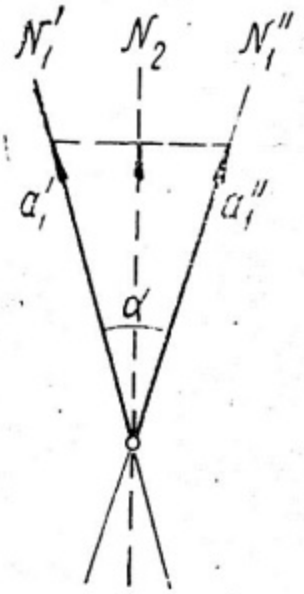

Рис. 21-2

В результате анализатор N_2 дает два световых поля. Если главную плоскость анализатора N_2 установить по биссектрисе угла α, то яркости обеих полей сравняются, так как в этом случае проекции векторов a_1' и a_1'' на направление N_2 станут равными. При введении между поляризатором и анализатором оптически активного вещества плоскости поляризация обоих пучков повернутся в одну сторону на один и тот же угол φ, и яркости полей в анализаторе N_2 изменятся. Очевидно, для восстановления равенства яркостей полей достаточно повернуть анализатор N_2 на тот же угол φ, значение которого и определяет величину угла поворота плоскости поляризации оптически активным веществом.

Описание прибора

Прибор, используемый в настоящей работе, носит название полутеневого поляриметра. Его схема показана на рис. 21-3. Здесь свет от осветителя *Осв* проходит через светофильтр *С* и поляризатор. *П* — поляроидную пленку, выделяю-

щую из естественного света плоскополяризованный. Средняя часть светового пучка проходит затем через тонкую кварцевую пластинку *К*, вырезанную таким образом, что она поворачивает плоскость поляризации на небольшой угол α (порядка нескольких градусов). Далее свет проходит через исследуемое вещество *В*, анализатор *А* (также поляроидную пленку) и попадает в зрительную трубку, через окуляр *Ок* которой наблюдается световое поле, разделенное на три участка. При этом плоскость поляризации света, образующего средний участок поля, составляет угол α с плоскостью поляризации световых пучков, образующих крайние участки.

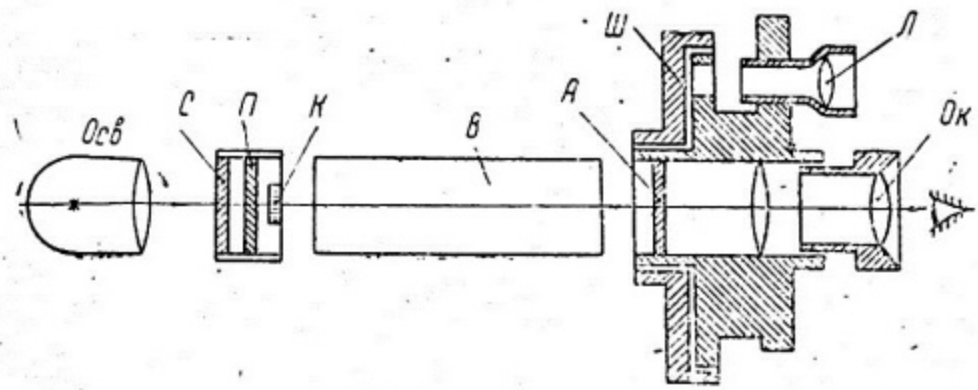

Рис. 21-3

Если вращать анализатор *А*, то яркости всех трех участков светового поля будут меняться: при уменьшении яркости среднего участка яркость крайних увеличивается и наоборот.

Анализатор *А* закреплен в оправе зрительной трубки; вращая последнюю мы тем самым поворачиваем и анализатор. Угол поворота анализатора отсчитывается по неподвижной шкале лимба *Ш* через лупу *Л*. Шкала снабжена подвижным двойным нониусом, вращающимся совместно с анализатором. Цена деления шкалы 1°, точность отсчета по нониусу 0,1°. Нуль шкалы соответствует одинаковой яркости всех участков светового поля в отсутствии оптически активного вещества.

Исследуемый раствор заливается в специальную кювету—стеклянную трубку с металлическими наконечниками, на которые навинчиваются муфты, поджимающие круглые стеклянные оконца к торцам трубки. Между краями муфт, трубкой и стеклянными оконцами расположены резиновые прокладки, предохраняющие оконца от образования напряжений, которые вследствие двойного лучепреломления мешают наблюдению и снижают точность измерений.

Задание

1. Определение оптимального режима работы прибора и его нулевого положения

Предварительно отфильтрованный растворитель залить осторожно в трубку, следя при этом за тем, чтобы в жидкости не образовывались пузырьки воздуха. Заполненные трубки производить до появления выпуклого мениска, после чего на торец трубки надвинуть стеклянное оконце, наложить резиновую прокладку и завинтить муфту (не очень туго!). Удалить загрязнения и следы жидкости с наружных частей стеклянных оконцев.

Установить трубку с растворителем в прибор, включить осветитель, и потенциометром отрегулировать накал лампы на наименьшую яркость полей, при которой еще возможно производить наблюдения.

Вращением накатанного кольца окуляра добиться отчетливого видения границ тройного поля. Поворачивая зрительную трубку с анализатором, тщательно уравнять яркости всех трех участков светового поля, после чего по шкале лимба с помощью нониуса сделать отсчет угла ϑ, соответствующего взятому напряжению. Измерение повторить не менее семи раз.

Увеличивая напряжение каждый раз на 5—10 *в*, провести те же измерения. Таким образом пройти весь диапазон напряжений, при которых возможно проводить наблюдения. Данные измерений занести в таблицу.

Вычислить для каждого значения напряжения U среднюю ошибку $\Delta\vartheta$ в определении угла ϑ. Построив график зависимости $\Delta\vartheta$ от U, определить оптимальное напряжение, соответствующее минимальному значению $\Delta\vartheta$.

Угол ϑ_0, отвечающий этому напряжению принять за «нулевой».

2. Определение концентрации раствора

Вылив растворитель,, залить в трубку отфильтрованный раствор сахара известной концентрации. Вставить трубку в прибор, установить найденное выше оптимальное напряжение и проверить фокусировку (четкое видение границ тройного поля).

Поворотом зрительной трубки с анализатором добиться тщательного выравнивания яркостей полей, после чего произвести отсчет угла ϑ_1 по шкале лимба. Повторив данное измерение не менее трех раз, вычислить среднее значение $\overline{\vartheta_1}$.

Аналогичные измерения проделать для четырех растворов с различными известными концентрациями и одного раствора

сахара с неизвестной концентрацией. По полученным углам ϑ_i рассчитать соответствующие углы поворота плоскости поляризации всех растворов φ_i ($\varphi_i = \vartheta_i - \vartheta_0$).

Построив градуировочный график (зависимость угла φ от концентрации раствора), найти по нему неизвестную концентрацию раствора сахара.

Измерив длину трубки, рассчитать по формуле (21.1) коэффициент $[\alpha]$ для исследуемого раствора и сравнить его с табличным значением.

Работа 22

ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

ВВЕДЕНИЕ

При пропускании плоско-поляризованного света через различные вещества было обнаружено, что некоторые из них (кварц, раствор сахара, никотин и др.) поворачивают плоскость поляризации света. Такие вещества получили название *оптически активных.*

В других веществах, оптически неактивных, таких, например, как вода, стекло и пр., в обычных условиях не происходит поворота плоскости поляризации. Однако под воздействием магнитного поля и эти вещества приобретают способность вращать плоскость поляризации света (*эффект Фарадея*), причем для оптически активных веществ магнитный эффект, как показывает опыт, будет складываться с эффектом естественного вращения плоскости поляризации.

Эффект Фарадея наблюдается в любых прозрачных веществах, твердых, жидких и газообразных.

Экспериментально было показано, что в том случае, когда свет распространяется через вещество вдоль направления магнитного поля, угол поворота его плоскости поляризации φ_H, обусловленный магнитным эффектом, определяется следующим соотношением:

$$\varphi_H = \rho l H, \qquad (22.1)$$

где ρ — так называемая *постоянная Верде*, l — длина пути света в веществе, H — напряженность магнитного поля.

Постоянная Верде обычно выражается в *угл. мин/см · э.* Эта постоянная зависит от свойств вещества и в некоторой степени от длины волны света. Для большинства веществ $\rho \sim 0{,}01$—$0{,}02$ *угл. мин/см · э,* для некоторых веществ ρ достигает значения нескольких единиц.

Направление магнитного вращения плоскости поляризации зависит *только* от направления магнитного поля и не зависит от направления распространения света. Так, если плоскополяризованный свет, проходит через оптически активное вещество, помещенное в магнитное поле, то изменение направления последнего приведет к тому, что в выражении для результирующего угла поворота φ плоскости поляризации

$$\varphi = \varphi_H + \varphi_e, \qquad (22.2)$$

изменится лишь знак угла φ_H, в то время как знак угла φ_e естественного поворота плоскости поляризации остается без изменения.

По направлению магнитного вращения плоскости поляризации все вещества делятся на правовращающие (положительные) и левовращающие (отрицательные). Направление вращения плоскости поляризации определяется, если смотреть вдоль направления магнитного поля: правовращающие вещества вращают плоскость поляризации по часовой стрелки, левовращающие — против.

В заключение следует отметить, что эффект Фарадея не только позволяет глубже изучить свойства различных веществ, но и находит весьма интересные практические применения, например, для осуществления быстродействующих фотозатворов (время экспозиции порядка 10^{-8} *сек*), для быстрой модуляции света, для осуществления светофильтров с меняющейся областью пропускания света, оптических вентилей и др.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Изучение эффекта Фарадея производится на установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 22-1.

Свет от лампы накаливания *S*, будучи превращенный поляризатором N_1 в плоско-поляризованный, проходит кювету *O* с исследуемым веществом, которая находится в магнитном поле соленоида *L*. Угол поворота плоскости поляризации измеряется с помощью специального анализатора N_2.

Анализатор N_2 представляет собой компенсатор *П, Л* с полутеневым анализатором *A*.

Компенсатор состоит из пластинки *П* из правовращающего кварца и подвижного клина *Л* из левовращающего кварца, причем оптические оси пластинки и клина ориентированы параллельно направлению проходящего света. Перемещая клин *Л* перпендикулярно оптической оси, можно скомпенсировать любой поворот плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Полутеневой анализатор A состоит из двух неподвижных призм Николя, склеенных вдоль, причем главные плоскости

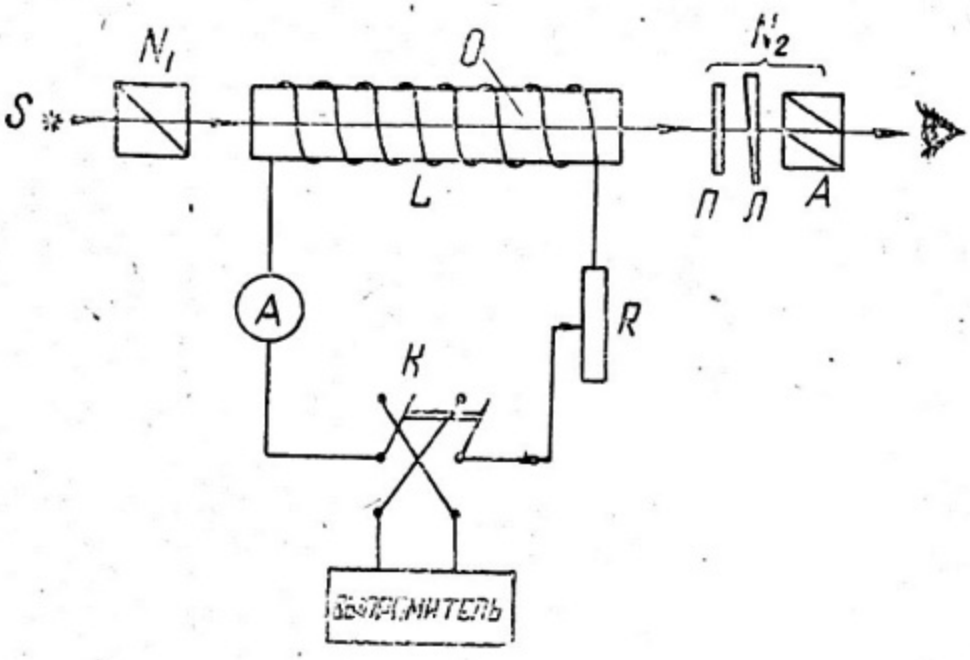

Рис. 22-1

этих призм N_2' и N_2'' (рис. 22-2) составляют между собой небольшой угол α. При прохождении через такой анализатор плоско-поляризованного света образуются два отличающихся по яркости поля, разделенных тонкой линией. Яркости полей станут равными и линия их раздела исчезнет, если направление светового вектора s совпадает с биссектрисой угла α, ибо в этом случае проекции вектора s на направления N_2' и N_2'' будут равными т. е. $s' = s''$.

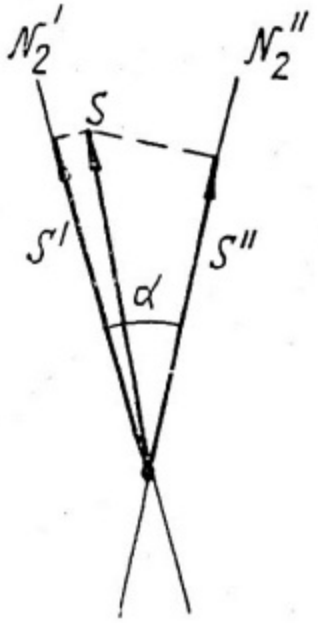

Рис. 22-2

Яркости полей приводят к равенству, перемещая клин $Л$ компенсатора. Перемещение клина непосредственно связано с углом поворота плоскости поляризации и отсчитывается по шкале прибора.

Электрическая цепь соленоида L (рис. 22.1) содержит реостат R, амперметр A и переключатель K, позволяющий изменять направление электрического тока, а следовательно и магнитного поля в соленоиде. Длина соленоида и полное число его витков указаны на установке.

Внешний вид оптического прибора показан на рис. 22-3. Здесь *1* — осветительная головка, в которой расположены лампа накаливания, конденсорная линза и поляризатор; *2* — камера, куда помещается кювета *3* с исследуемой жидкостью (кювета находится внутри соленоида); *4* — изме-

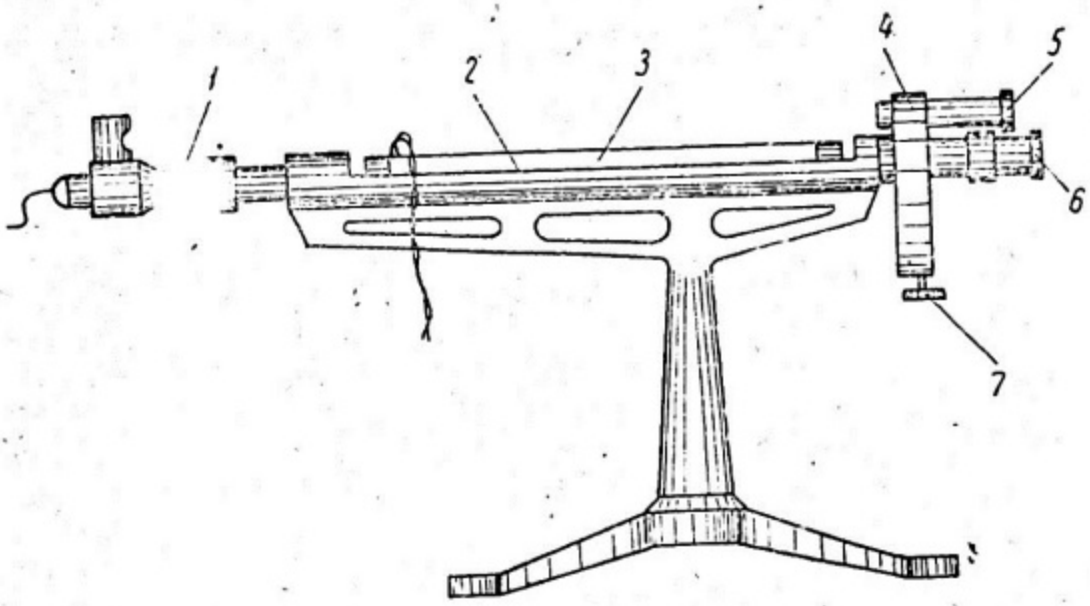

Рис. 22-3

рительный узел, в котором расположены компенсатор, полутеневой анализатор, шкала с нониусом для отсечта угла поворота плоскости поляризации, лупа *5* для отсчета показаний по шкале, зрительная труба *6* и рукоятка *7* кремальерной передачи для перемещения подвижного клина компенсатора и связанной с ним отсчетной шкалы (100 делений шкалы соответствуют углу 34° 39′).

Задание

1. Определение зависимости угла поворота плоскости поляризации от напряженности магнитного поля

Вынув кювету из прибора, отвинтить с одного конца муфту и с помощью пипетки осторожно налить в трубку исследуемый оптически активный раствор (до образования выпуклого мениска). Затем надвинуть стеклянное оконце на торец трубки, избегая образования пузырьков воздуха, после чего навинтить муфту обратно. Навинчивание муфты не должно производиться очень туго во избежание искажений, связанных с возникновением двойного лучепреломления в стеклянных оконцах при механических деформациях. На оконцах не должно быть никаких загрязнений и следов жидкости.

Наполненную кювету вставить в камеру *2* (рис. 22-3) и включить осветитель прибора.

Наблюдая в окуляр *6*, вращением его накатанного кольца получить четкое изображение двух полей. Затем рукояткой *7* тщательно уравнять их яркости (в отсутствии магнитного поля) и через лупу *5* снять отсчет по нониусу. Измерения повторить не менее трех раз.

После этого переключателем K (рис. 22-1) и реостатом R установить определенное направление и величину тока 4 *а*. Опять уравнять яркости обеих полей (не менее трех раз) и снять соответствующие отсчеты по нониусу. Проделать те же измерения, изменив переключателем K направление тока.

Последовательно увеличивая ток в соленоиде, произвести аналогичные измерения через каждые 2 *а* вплоть до величины тока 16 *а*.

Определив цену деления шкалы, найти действительные значения углов поворота плоскости поляризации в минутах.

По формуле соленоида $H = 0{,}4\,\pi\,ni$, где H — напряженность магнитного поля в *эрстедах*, n — число витков на единицу длины, i — ток в *амперах*, вычислить значения напряженности магнитного поля, соответствующие измеренным значениям углов.

Результаты измерений и расчетов записать в таблицу.

2. Обработка данных измерений

По полученным данным построить график зависимости угла поворота плоскости поляризации φ (в минутах) от напряженности магнитного поля H (в эрстедах).

Из графика найти среднее значение отношения $\Delta\varphi/\Delta H$, после чего по формуле *

$$\rho = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta H}, \qquad (22.3)$$

где l — длина кюветы, вычислить постоянную Верде ρ.

По окончании опыта жидкость из кюветы вылить в предназначенную для нее колбу.

---

* Формула (22.3) непосредственно следует из соотношений (22.1) и (22.2), если учесть, что угол естественного вращения φ_0 плоскости поляризации не зависит от величины и направления магнитного поля H.

Работа 23

ГРАДУИРОВКА МОНОХРОМАТОРА*

ВВЕДЕНИЕ

Монохроматором называется спектральный прибор, служащий для выделения из исследуемого спектра узкого участка или отдельной спектральной линии. Данный прибор используется для исследования как спектров испускания, так и спектров поглощения.

Принципиальная оптическая схема монохроматора, как и любого спектрального прибора, включает в себя следующие основные элементы (рис. 23-1): осветитель *Осв* (исследуемый источник света с конденсорной линзой), коллиматор *Кол* (кол-

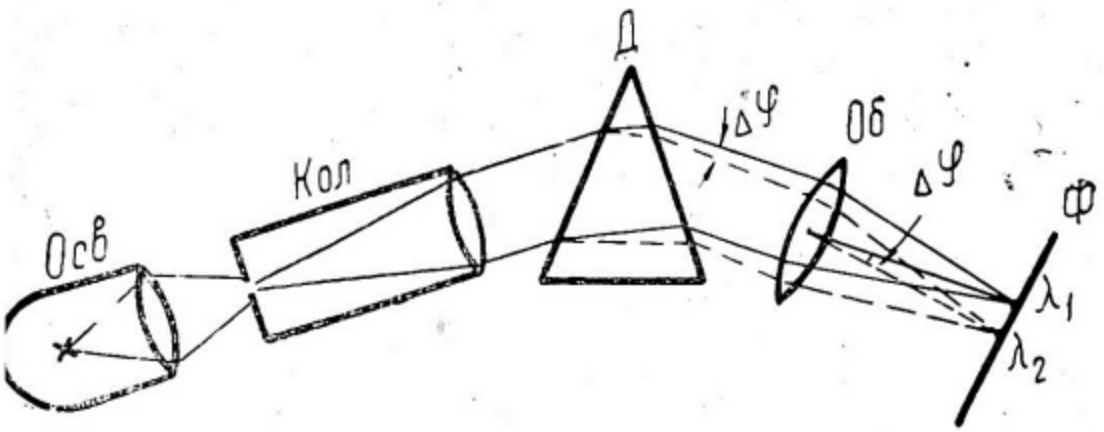

Рис. 23-1

лиматорный объектив, в передней фокальной плоскости которого расположена узкая прямоугольная щель), диспергирующая призма** *Д*, отклоняющая пучки параллельных лучей

* Студентам, проводящим градуировку стилоскопа, необходимо воспользоваться описанием данного прибора в работе 25 (стр. 162).

** В качестве диспергирующего элемента используются также дифракционные решетки и различные интерференционные приборы.

различных длин волн на разные углы, и фокусирующая система — объектив *Об*, в фокальной плоскости *Ф* которого образуется спектр исследуемого источника света.

Если источник света дает излучение, состоящее из отдельных длин волн, то наблюдаемый спектр будет состоять из отдельных спектральных линий, каждая из которых представляет собой изображение коллиматорной щели в монохроматическом свете соответствующей длины волны (*линейчатый спектр*).

Регистрация спектра в зависимости от назначения и устройства прибора производится различными способами — визуально, фотографированием, фотометрированием и др.

Материалом диспергирующих призм в монохроматорах служит: кварц, сильвин, флюорит — для ультрафиолетовой части спектра; флинт — для видимой части спектра; каменная соль, сильвин, кварц, флюорит — для инфракрасной части спектра.

Одной из наиболее важных характеристик диспергирующей системы является *угловая дисперсия*. Она характеризует способность спектрального прибора разделять пучки лучей различных длин волн. Угловая дисперсия определяется угловым расстоянием между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на 1 Å. Мерой угловой дисперсии является величина

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}, \qquad (23.1)$$

где $\Delta\lambda$ — разность длин волн двух достаточно близких спектральных линий, которые образованы пучками лучей, составляющими между собой угол $\Delta\varphi$ (рис. 23-1).

Угловая дисперсия зависит от длины волны, а для призменного монохроматора, кроме того, — от числа диспергирующих призм, их материала и величины преломляющих углов данных призм.

Для проведения различных спектральных работ на монохроматоре последний должен быть предварительно тщательно проградуирован, т. е. должна быть определена связь между длинами световых волн и положением соответствующих спектральных линий по шкале или барабану прибора. Градуировка монохроматора и является основной задачей данной работы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Монохроматор типа ДМ (двойной монохроматор) представляет собой соединение двух последовательно поставленных монохроматоров с призмами постоянного угла отклонения.

Такое соединение увеличивает дисперсию и обеспечивает лучшую монохроматизацию света.

Принципиальная схема двойного монохроматора (вместе с осветителем) представлена на рис. 23-2. Свет от исследуемого источника *1* освещает с помощью конденсорной линзы *2* входную щель *3*, расположенную в передней фокальной плоскости коллиматорного объектива *4*. Пройдя последний, свет

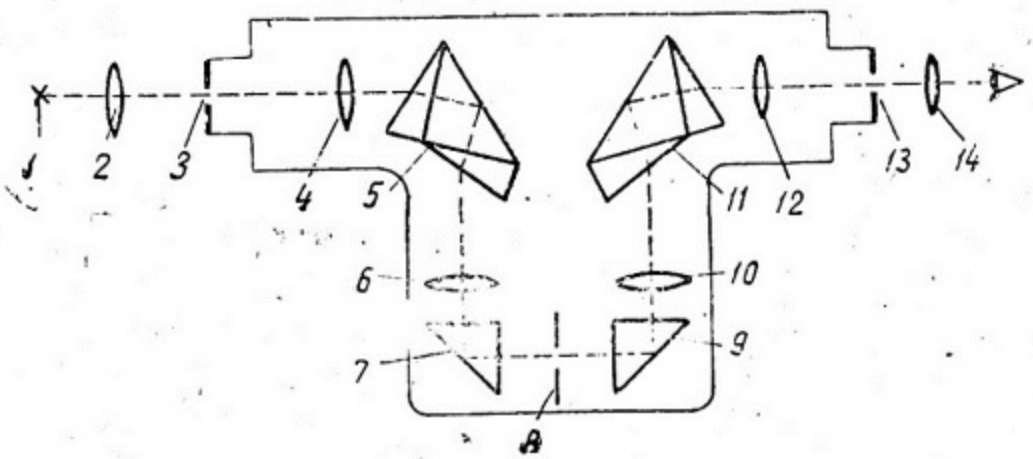

Рис. 23-2

преобразуется в пучок параллельных лучей, которые затем преломляются диспергирующей системой *5*, состоящей из двух диспергирующих призм и одной поворотной, и попадают в объектив *6*. Поворотная призма *7* направляет пучок лучей в щель *8*, расположенную в совмещенных фокальных плоскостях объективов *6* и *10*.

Устройство второй части монохроматора аналогично первой. Пучок лучей из щели *8* через поворотную призму *9* попадает в объектив *10* и диспергирующую систему *11*. После вторичного преломления световые лучи собираются объективом *12* в его фокальной плоскости, где находится щель *13*. Полученный участок спектра наблюдается через окуляр *14*.

Внешний вид монохроматора представлен на рис. 23-3. Здесь *1* — конденсорная линза, *2* и *3* — микровинты для регулировки ширины входной и выходной щелей прибора, *4*—окуляр, через который производится наблюдение спектра, *5*—измерительный барабан. С помощью данного барабана осуществляется поворот диспергирующей системы *5* (на рис. 23-2), и тем самым вводится в поле зрения окуляра интересующий нас участок спектра.

На барабане нанесена круговая шкала, позволяющая отсчитывать положение выделенных спектральных линий в поле зрения окуляра. Отсчет делается при помощи неподвижного индекса, расположенного у шкалы барабана.

В данной работе для градуировки монохроматора в качестве источника света используется ртутно-кварцевая лампа

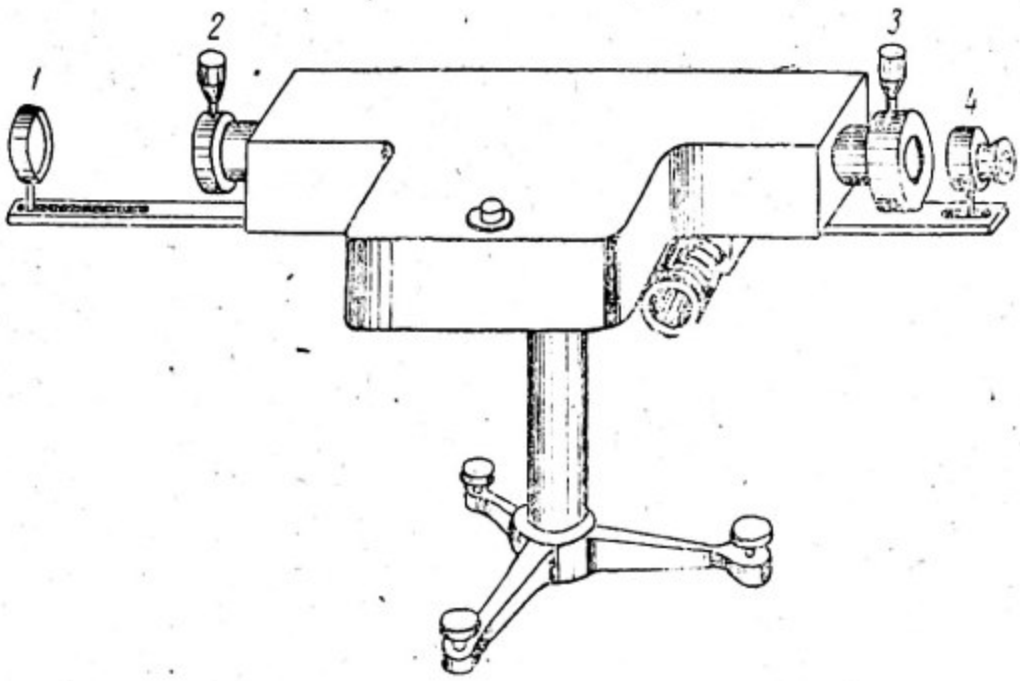

Рис. 23-3

сверх-высокого давления СВДШ. Основные линии ее спектра в видимой области указаны в табл. 23.1.

Таблица 23.1

Длина волны, Å	Цвет	Интенсивность	Длина волны, Å	Цвет	Интенсивность
7092	красный	средняя	5046	голубой	слабая
7082	»	»	5026	»	»
6907	»	слабая	4992	»	средняя
6234	»	средняя	4916	»	»
6123	оранжевый	слабая	4358	фиолетовый	яркая
6073	»	»	4347	»	слабая
5890	»	»	4344	»	»
5790	желтый	яркая	4339	»	»
5770	»	»	4108	»	»
5461	зеленый	»	4078	»	средняя
			4047	»	яркая

Для определения области пропускания светофильтра к установке прилагается осветитель с лампой накаливания, дающей сплошной центр, и исследуемый светофильтр.

Задание

1. Градуировка монохроматора

Включить ртутную лампу. Осторожно перемещая конденсорную линзу, добиться равномерного освещения входной щели монохроматора.

Микровинтами *2* и *3* (рис. 23-3) открыть входную и выходную щели прибора: входная щель должна быть достаточно узкой, выходная — значительно более широкой.

После этого, медленно поворачивая барабан *5*, ввести в поле зрения окуляра видимый участок спектра. Регулируя положение окуляра и ширину входной щели, добиться максимальной резкости и остроты видимых спектральных линий.

Продолжая поворачивать измерительный барабан, просмотреть последовательно весь спектр (общее число, яркость и расположение линий).

Выбрав несколько наиболее ярких спектральных линий, расположенных в различных участках спектра, потренироваться в наводке и совмещении этих линий с правым (или левым) краем выходной щели монохроматора, ширина которой в процессе всех последующих измерений должна оставаться неизменной.

После этих предварительных упражнений можно приступить к непосредственным измерениям. Для этого поворотом барабана ввести в поле зрения окуляра первую видимую линию спектра (рекомендуется начинать с красной части спектра). Совместив середину спектральной линии с выбранным краем выходной щели, взять отсчет положения линии по индексу барабана.

Аналогичные измерения проделать последовательно для всех остальных линий спектра, отмечая одновременно цвет линий и оценивая видуально их яркость (яркая, средняя, слабая).

Промеры положения линий спектра повторить независимо не менее трех раз. Результаты измерений записать в таблицу.

По результатам измерений изобразить на миллиметровой бумаге схему спектра — расположение линий относительно делений шкалы барабана. При этом толщина вычерчиваемых линий должна приблизительно соответствовать яркости самих спектральных линий.

Сравнив расположение изображенных линий этой схемы с табл. 23.1, установить их соответствие и тем самым определить длины волн самих спектральных линий.

После этого построить градуировочный график монохроматора, отложив по оси ординат деления барабана, а по оси абсцисс длины волн соответствующих спектральных линий. На графике необходимо указать ширину выходной щели монохроматора, а также по какому краю (правому, левому) производилось совмещение линий.

По данному графику построить также график угловой дисперсии монохроматора, отложив по оси абсцисс длины волн, а по оси ординат число делений барабана Δn, приходящихся на 1 Å, т. е. величину $\Delta n/\Delta\lambda$.

2. Определение области пропускания светофильтра

Включив осветитель с лампой накаливания, наладить освещение входной щели монохроматора.

На вход прибора надеть исследуемый светофильтр, так чтобы он закрывал половину входной щели (по высоте). Вращая барабан и наблюдая за интенсивностью различных участков спектра, пропущенных через светофильтр, определить с помощью градуировочного графика область пропускания данного светофильтра и длину волны (приблизительно), отвечающую его наибольшей пропускаемости.

Работа 24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗМЕННОГО СПЕКТРОГРАФА

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что линейчатый оптический спектр, являющийся одной из фундаментальных характеристик вещества, содержит весьма разнообразную и важную информацию о составе вещества, строении и свойствах атомов и молекул и др. Отсюда понятно значение для научных исследований и практических применений спектральных приборов — приборов, предназначенных для разложения в спектр по длинам волн излучений исследуемых источников. Существуют три основных типа спектральных приборов в соответствии с трёмя методами разложения излучений в спектр: призменные (основанные на зависимости показателя преломления от длины волны света), дифракционные (с использованием дифракционных решеток) и интерференционные (основанные на явлении интерференции света).

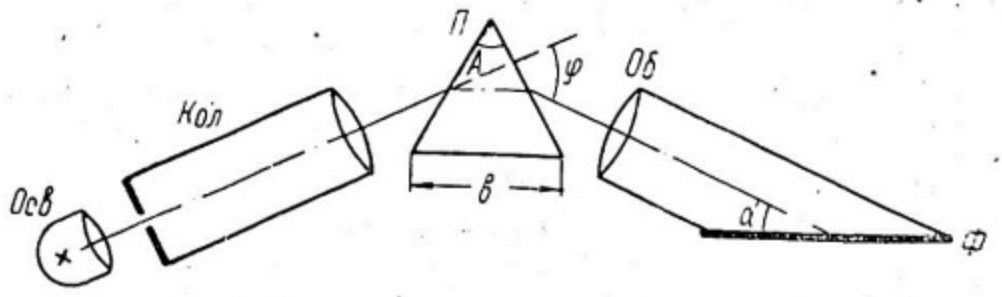

Рис. 24-1

В настоящей работе изучается однопризменный кварцевый спектограф — прибор, служащий для получения и фотографирования спектров. Основными оптическими элементами данного прибора являются (рис. 24-1): осветитель *Осв* (иссле-

дуемый источник и конденсорная линза), коллиматор *Кол* (коллиматорный объектив, в передней фокальной плоскости которого расположена узкая прямоугольная щель), диспергирующая призма *П* и объектив *Об*, в фокальной поверхности которого находится фотопластинка *Ф*.

Каждая спектральная линия линейчатого спектра, образующегося в плоскости фотопластинки, представляет собой по существу изображение коллиматорной щели в лучах света соответствующей длины волны.

Качество получаемого спектра (расстояние между спектральными линиями, их ширина и интенсивность) зависит при прочих равных условиях от следующих характеристик прибора: *дисперсии* (угловой и линейной), *разрешающей способности* и *светосилы*.

В данной работе производится определение дисперсии и разрешающей силы прибора.

Дисперсия характеризует способность спектрального прибора пространственно разделять пучки лучей различных длин волн. Угловая дисперсия определяется угловым расстоянием $\Delta\varphi$ между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $\Delta\lambda = 1$ Å. Мерой угловой дисперсии является величина $\Delta\varphi/\Delta\lambda$.

Если положение линий наблюдают на спектрограмме, то удобно заменить угловое расстояние между линиями линейным расстоянием Δl и соответственно вместо угловой дисперсии ввести *линейную дисперсию* $\Delta l/\Delta\lambda$.

Связь между угловой и линейной дисперсией в том случае, когда плоскость фотопластинки составляет угол α с оптической осью прибора (рис. 24-1), имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta l}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\sin\alpha}{f}, \qquad (24.1)$$

где f — фокусное расстояние объектива *Об*.

Найдем теперь выражение для угловой дисперсии призмы. Так как угол отклонения φ при фиксированном угле падения света на призму зависит от показателя преломления n, а n в свою очередь зависит от длины волны λ, то можно написать

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta n} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}, \qquad (24.2)$$

где Δn — разница в показателях преломления двух достаточно близких спектральных линий, отличающихся по длинам волн на $\Delta\lambda$; величина $\Delta n/\Delta\lambda$ называется *дисперсией вещества* и зависит от свойств последнего.

В спектрографах призма обычно устанавливается так, чтобы угол отклонения φ был *наименьшим* для *средней* части спектра. При этом

$$\frac{\sin\frac{A+\varphi}{2}}{\sin\frac{A}{2}} = n, \qquad (24.3)$$

где A — преломляющий угол призмы.

Из формул (24.2) и (24.3) в результате соответствующих преобразований получаем искомое выражение для угловой дисперсии:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = \frac{2\sin\frac{A}{2}}{\sqrt{1-n^2\sin^2\frac{A}{2}}} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}. \qquad (24.4)$$

Наличие значительной дисперсии спектрального прибора еще не означает, что две близкие спектральные линии, как бы монохроматичны они ни были, будут различимы на спектрограмме.

Вследствие ограничения световых пучков, например, размерами призмы, каждая спектральная линия будет представлять собой *дифракционное изображение* щели коллиматора. Это приводит к расширению линий и вызывает ограничение разрешающей силы прибора.

Разрешающая сила характеризует способность спектрального прибора разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн. За меру разрешающей способности принимается отношение $\lambda/\delta\lambda$, где λ — длина волны, около которой производится измерение, а $\delta\lambda$ — наименьшая разница в длинах волн двух разрешаемых спектральных линий.

Можно показать, что разрешающая сила призменного спектрографа в том случае, когда падающий пучок света заполняет всю призму, равна

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = b\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}, \qquad (24.5)$$

где b — основание призмы (рис. 24-1).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемая в данной работе установка состоит из следующих приборов: дугового генератора со штативом, спектрографа Q-24 и столика для рассматривания спектрограмм.

Дуговой генератор служит для получения дугового разряда переменного тока между исследуемыми электродами. Извест-

но, что при использовании металлических электродов дуга на переменном токе поддерживаться не может, так как в моменты спадания тока до нуля концы электродов благодаря высокой теплопроводности металла успевают настолько остыть, что перестают служить ионизаторами разрядного промежутка. Для поддержания дуги обычно используется электрическая схема, принцип действия которой поясняет рис. 24-2 (генератор активированной дуги).

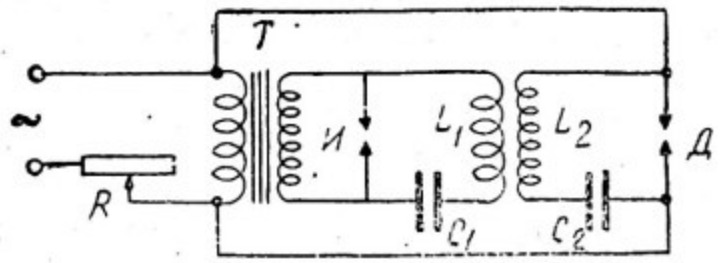

Рис. 24-2

В моменты, когда на вторичной (повышающей) обмотке трансформатора T напряжение достигает достаточно большого значения, наступает пробой искрового промежутка $И$. Вследствие этого в контуре L_1C_1 возникнут высокочастотные колебания с большой амплитудой напряжения на индуктивности L_1. Контур L_1C_1 индуктивно связан с контуром L_2C_2, настроенным в резонанс с первым. В результате за счет высокочастотных колебаний в контуре L_2C_2 дуговой разряд в промежутке $Д$ будет поддерживаться даже в моменты спадания основного тока (от сети) до нуля.

Устойчивость дугового разряда регулируется величиной тока (реостатом R), величиной искрового промежутка $И$ и расстоянием между электродами дуги $Д$.

Дуга создается между медными электродами, которые крепятся в специальном штативе. Сам штатив смонтирован внутри защитного металлического ящика.

Спектрограф Q-24. Внешний вид прибора изображен на рис. 24-3. Здесь *2* — входная щель коллиматора, закрываемая специальным колпачком; ширина щели (обычно около 0,01 *мм*) регулируется винтом *4*, высота щели — диафрагмой *3* (путем перемещения ее вдоль паза); винт *1* служит для фокусировки линий спектра на пластинке (вращением этого винта осуществляется перемещение коллиматорного объектива, расположенного в левом цилиндрическом кожухе)*. В вертикаль-

* Необходимо иметь в виду, что прибор отъюстирован заранее и поэтому никакой самостоятельной регулировки щели и фокусировки спектра делать не рекомендуется.

ном цилиндрическом кожухе находится кварцевая призма. В правом цилиндрическом кожухе расположен камерный объектив, дающий изображение спектра в фотокамере *5*. Фотокамера имеет кассетодержатель *6*, в окно которого вставляется кассета с фотопластинкой. Кассета закрепляется зажимными винтами *7*; она имеет шторку, выдвигаемую на время съемки.

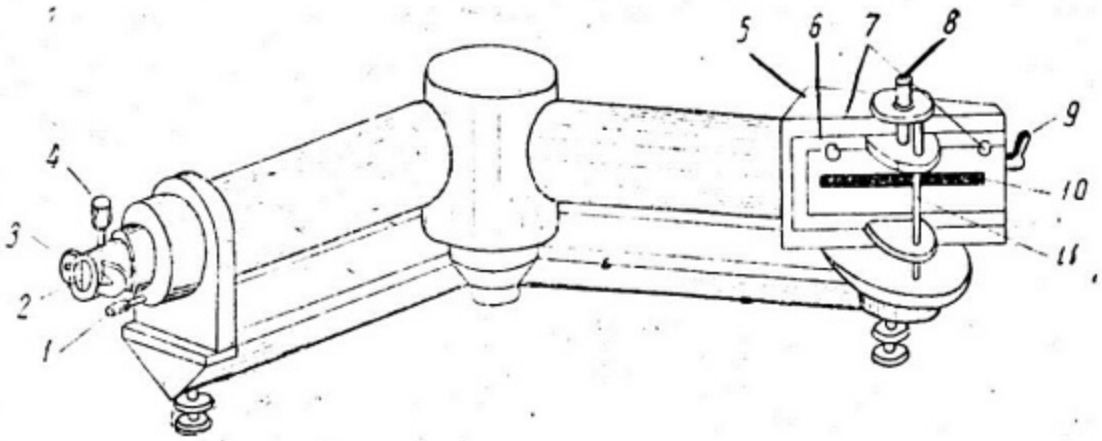

Рис. 24-3

Кассетодержатель можно перемещать винтом *8* в вертикальном направлении вдоль направляющего стержня *11*. На стержне нанесены деления шкалы, позволяющей фиксировать вертикальное положение кассеты с фотопластинкой.

Съемка спектра производится через горизонтальную прорезь *10*. Через эту прорезь поворотом рукоятки *9* на себя к поверхности фотопластинки прижимается специальная планка с имеющейся на ней стандартной шкалой (на рисунке не видна). Осветитель шкалы включается в сеть через понижающий трансформатор.

Столик для рассматривания спектрограмм СТЛ показан на рис. 24-4. Полученная спектрограмма помещается на матовое стекло *1* и укрепляется прижимными клеммами *2*. Матовое стекло освещается включением тумблера *7*. Освещенность спектрограммы можно изменять вращением маховичка *5*, который связан с поворотом зеркала, расположенного под матовым стеклом. Вращением маховичка *4* осуществляется продольное перемещение предметного столика *3*. Закрепление столика в определенном положении достигается поворотом рычажка *6*. Измерения спектрограммы производится через микроскоп *10*, поперечное перемещение которого осуществ-

ляется маховичком *9*. Маховичок *8* служит для фокусировки микроскопа.

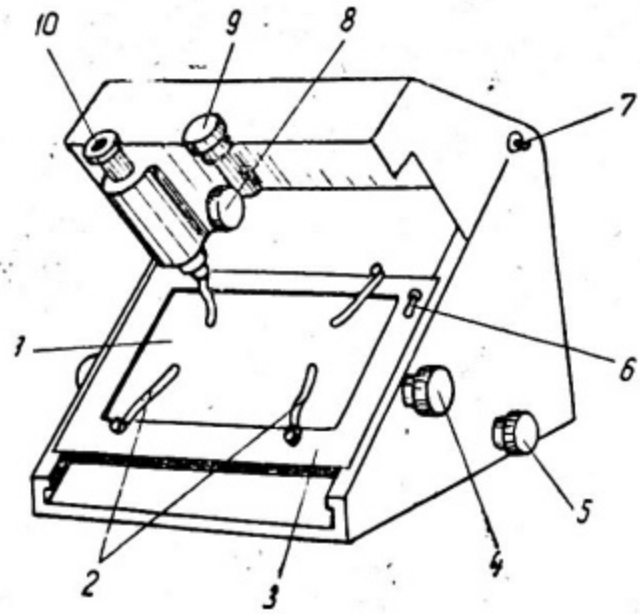

Рис. 24-4

Микроскоп снабжен двумя сменными окулярами, характеристики которых следующие:

Увеличение окуляра	Поле зрения, *мм*	Цена деления окулярной шкалы (*мм*/дел)
8^{x}	19	0,1
15^{x}	10	0,05

К установке прилагаются:

1. Дисперсионная кривая спектрографа, определяющая зависимость положения спектральных линий по стандартной шкале от длины световой волны.
2. График зависимости показателя преломления n кварцевой призмы спектрографа от длины волны λ.
3. Атлас спектральных линий меди.

Задание

1. Получение спектрограммы меди

Зачистив специальным напильником концы медных электродов, установить их (при выключенном генераторе дуги) в штативе на расстоянии 1,5—2 *мм* друг от друга.

Закрыть дверцу защитного ящика, в котором находится штатив, после чего нажимом контакта на генераторе включить дугу. Перемещением конденсора добиться яркого и равномерного освещения входной щели спектрографа. Затем закрыть щель колпачком и выключить генератор дуги.

Зарядив в фотокабине кассету фотопластинкой (эмульсией к шторке), установить ее в кассетодержателе. Винтом *8* (рис. 24-3) кассету переместить в крайнее нижнее положение, после чего выдвинуть шторку (не до конца!).

Поворотом рукоятки *9* на себя привести стандартную шкалу в соприкосновение с фотопластинкой. Включив осветитель шкалы, сфотографировать ее.

Затем переместить кассету на 2 деления вверх, включить генератор и сфотографировать спектр, сняв на время экспозиции колпачок с входной щели спектрографа. Фотографирование спектра при разных экспозициях повторить не менее трех раз, перемещая каждый раз кассету вверх на 2 деления. Время экспозиции для шкалы и спектра задается лаборантом.

Закончив фотографирование, выключить генератор, задвинуть шторку в кассету и в фотокабине проявить фотопластинку согласно приложению в конце сборника. Затем пластинку тщательно просушить в сушильном шкафу.

2. Обработка спектрограммы

Полученную спектрограмму укрепить на столике СТЛ эмульсией кверху. При этом необходимо проследить за тем, чтобы спектр располагался параллельно направлению поперечного перемещения микроскопа. Это легко проверить, наблюдая через микроскоп (при его перемещении) за горизонтальной границей спектра. После этого, освободив зажимной винт окуляра, повернуть последний так, чтобы окулярная шкала приняла положение параллельное горизонтальной границе спектра.

Выбрать по прилагаемому атласу пять пар спектральных линий (с известными длинами волн) в различных областях спектра.

С помощью дисперсионной кривой найти положение этих линий на спектрограмме. Затем, пользуясь окулярной шкалой и микрометром, измерить расстояние между серединами линий каждой пары. Данные измерений записать в таблицу.

3. Определение дисперсии и разрешающей способности прибора

Из полученных данных подсчитать линейную дисперсию прибора $\Delta l/\Delta\lambda$ в *мм/А*. Построить график зависимости линейной дисперсии от длины волны.

Вычислить разрешающую силу спектрографа для *средней* области спектра (2500—3000 Å) по формуле *

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{b \sin\alpha \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}}{2f \sin \frac{A}{2}} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta\lambda}, \qquad (24.6)$$

где b — основание призмы (65 *мм*), угол $\alpha = 23{,}5°$ (рис. 24-1), f — фокусное расстояние камерного объектива (50 *см*), A — преломляющий угол призмы (60°), n — показатель преломления вещества призмы. Значение показателя преломления находится по графику, прилагаемому к установке.

---

* Формула (24.6) следует непосредственно из формул (24.1), (24.4) и (24.5).

Работа 25

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЕМОВ КАЧЕСТВЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

ВВЕДЕНИЕ

Каждый элемент периодической системы Менделеева, будучи возбужденный тем или иным способом в газообразном состоянии, дает вполне определенный спектр испускания, который является такой же фундаментальной характеристикой элемента, как, например, его атомный вес.

Это однозначное соответствие между элементом и его спектром испускания связано с закономерностями в строении атомов элементов. Спектральные линии в спектрах атомов возникают в результате различных, но вполне определенных для каждого элемента, переходов электронов из одного энергетического состояния в другое. Поэтому оказывается возможным отождествить с тем или иным спектром испускания вполне определенный элемент периодической системы.

На этой возможности и основан метод качественного спектрального анализа, который позволяет достаточно быстро и просто устанавливать состав исследуемого вещества. Метод опирается на тот факт, что спектр испускания смеси атомов различных элементов содержит спектральные линии всех составляющих смеси. Например, спектр испускания сплава, состоящего из меди и цинка, содержит спектральные линии как меди, так и цинка. Сравнив такой спектр со спектрами испускания чистой меди и чистого цинка, можно убедиться в присутствии в данном сплаве как того, так и другого элемента.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемая в настоящей работе установка состоит из двух основных частей — электрической и оптической.

Электрическая часть установки служит для получения непрерывного дугового разряда между исследуемыми электродами. Она включает в себя специальный генератор

активированной дуги переменного тока и штатив с электрододержателями, заключенный в защитный ящик.

Принцип действия генератора описан в работе 24 (рис. 24-2).

Оптическая часть установки (рис. 25-1) состоит из осветителя *Осв* (исследуемого источника света *Д* и конденсорной линзы *К*) и *стилоскопа СТ* — спектрального прибора, предназначенного для быстрого качественного и полуколичественного анализа сплавов и рассчитанного для визуальных наблюдений.

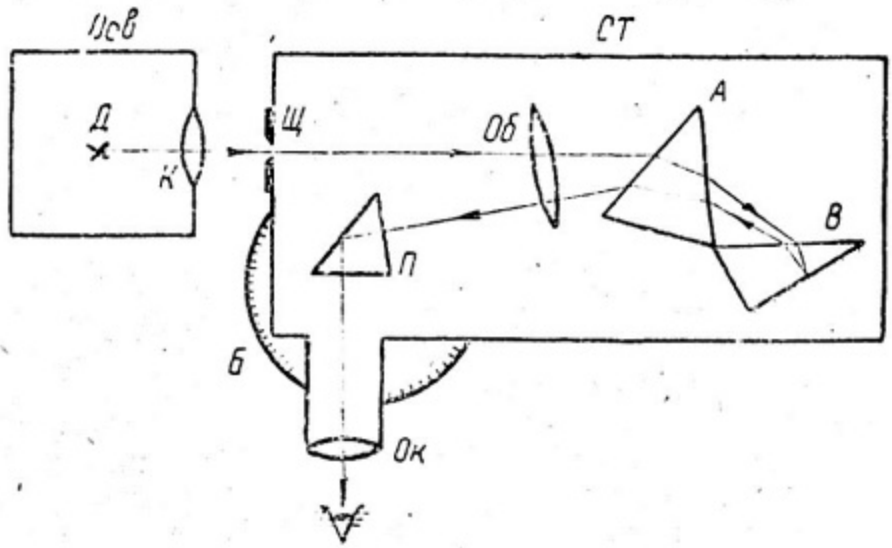

Рис. 25-1

Оптическая схема стилоскопа включает в себя три основные части: коллиматор (для получения параллельного пучка света от исследуемого источника), диспергирующая система (для пространственного разделения излучений различных длин волн) и зрительная труба (для наблюдения получающегося спектра).

Принцип действия стилоскопа, используемого в данной работе, следующий. Свет от исследуемого источника *Д* (рис. 25-1), пройдя конденсорную линзу *К* и узкую (около 0,02 *мм*) входную щель *Щ*, расположенную в передней фокальной плоскости коллиматорного объектива *Об*, преобразуется последним в пучок параллельных лучей. Далее свет проходит диспергирующую призму *А*, затем призму *В*, отражается от ее задней посеребренной грани и опять проходит призмы *В* и *А*, но в обратном направлении *. В результате двойного про-

* Диспергирующая система, в которой лучи проходят в прямом и обратном направлении, отразившись от плоского зеркала, называется *автоколлимационной*.

хождения света через призмы *А* и *В* дисперсия системы оказывается эквивалентной дисперсии трех 60-градусных призм (призма *А* имеет преломляющий угол 60°, призма *В* —30°).

После прохождения системы призм свет попадает опять в объектив *Об*, служащий одновременно и объективом зрительной трубы. В фокальной плоскости объектива *Об* образуется линейчатый спектр, представляющий собой ряд цветных изображений коллиматорной щели *Щ*. Этот спектр рассматривается через окуляр *Ок* зрительной трубы, оптическая ось которой повернута на удобный для наблюдения угол с помощью поворотной призмы *П*.

Фокусировка линий спектра осуществляется вращением накатанного кольца окуляра. Для фиксации положения спектральной линии в поле зрения окуляра имеется указатель (короткий штрих). Положение линии, совмещенной с указателем, отсчитывается по шкале барабана *Б*, с помощью которого осуществляется поворот призмы *В*.

К установке прилагается дисперсионная кривая стилоскопа (график зависимости длины волны от положения спектральной линии по шкале барабана *Б*).

Задание

1. Получение спектра меди

С помощью напильников зачистить рабочие поверхности медных, цинковых и латунных электродов, следя за тем, чтобы для каждого электрода использовался закрепленный за ним напильник (иначе можно занести материал одного электрода на другой).

Установить в электрододержатели штатива электроды на расстоянии около 2—3 *мм* друг от друга, закрыть защитный ящик и нажимом контакта на генераторе включить дугу. Дуга должна зажечься сразу и гореть равномерно с ровным гудением без перерывов и потрескиваний.

Глядя в окуляр стилоскопа, проверить яркость спектра и исправность механизма его перемещения при вращении барабана.

Мигание спектра и изменение его яркости можно устранить, выключив дугу и слегка переместив электроды в электрододержателях.

Совмещая каждую линию спектра с указателем в поле зрения окуляра и беря соответствующие отсчеты по шкале барабана, промерить таким образом положения всех линий спектра (в прямом и обратном направлениях), отмечая одновременно их интенсивность (яркая, средняя, слабая) и цвет.

По полученным данным построить на миллиметровой бумаге схему спектра — расположение линий относительно де-

лений шкалы барабана, отмечая толщиной линий примерную яркость самих спектральных линий. Линии рекомендуется наносить соответствующими цветными карандашами.

С помощью дисперсионной кривой стилоскопа и табл. 25.1 отождествить линии спектра с соответствующими длинами волн меди.

Таблица 25.1

Длина волн основных линий * меди и цинка, Å

Медь			Цинк
6470	5135	4531	6483
6268	5106	4480	6362
6217	4705	4378	5182
6128	4675	4275	4811
5941	4651	4249	4722
5782	4649	4063	4680
5700	4587	4022	4298
5220	4556		4292
5218	4540		4058

2. Получение спектра цинка

Аналогичные измерения и построение спектра проделать с цинковыми электродами. При этом, имея в виду легкоплавность цинка, разряд в процессе работы следует включать на непродолжительные промежутки времени (1—2 *мин*), делая между ними небольшие паузы (0,5—1 *мин*).

Пользуясь дисперсионной кривой и табл. 25.1 отождествить линии спектра с соответствующими длинами волн цинка.

Получив отдельно спектры меди и цинка, построить объединенный спектр медь-цинк.

3. Определение спектрального состава сплава

Те же измерения и построение спектра проделать для латунных электродов.

Полученный спектр сравнить с объединенным спектром медь-цинк. Определив по дисперсионной кривой длины волн новых (по сравнению с медью и цинком) линий спектра лату-

* Цвет спектральных линий указан в таблице Приложения.

ии, установить с помощью табл. 25.2 наличие возможных примесей.

Таблица 25.2

Наиболее характерные линии испускания некоторых металлов

Металл	λ, Å	Металл	λ, Å
Алюминий	6243	Натрий	6161
	5593		6154
	5164		5896
	5151		5890
	4663		5688
			4983
Калий	5802		4669
	5005		
	4608	Олово	6462
	4505		6454
			5632
Марганец	5341		4525
	4824		
	4783	Свинец	4245
	4766		4062
	4762		4058
	4754		
	4452		

Работа 26

ПОЛУКОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НА СТИЛОМЕТРЕ

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что каждому элементу периодической системы Менделеева в газообразном состоянии соответствует вполне определенный спектр испускания, который является такой же фундаментальной характеристикой элемента, как, например, его атомный вес.

Однозначное соответствие между элементом и его спектром связано с закономерностями в строении самих атомов. Спектральные линии в спектрах атомов возникают в результате различных, но вполне определенных для каждого элемента, переходов электронов из одного энергетического состояния в другое.

Возможность отождествления спектра испускания с соответствующим элементом периодической системы лежит в основе *метода спектрального анализа* вещества — качественного и количественного.

Качественный анализ, устанавливающий состав вещества, опирается на тот факт, что спектр испускания смеси атомов различных элементов содержит спектральные линии всех составляющих смеси.

Количественный анализ, устанавливающий процентное содержание составляющих вещества, основан на сравнении интенсивности спектральных линий этих составляющих.

Установлено, что интенсивность спектральных линий в спектрах веществ зависит от ряда факторов: от вероятности соответствующих переходов электронов в атомах, которая может весьма сильно отличаться для разных переходов; от температуры и концентрации отдельных составляющих вещества, определяющих общее количество возбужденных атомов — источников излучения; от способа возбуждения атомов; от эффекта самопоглощения излучения и др.

Установлено также, что интенсивность I спектральной линии любой составляющей смеси зависит от ее концентрации C по формуле

$$I = \alpha C^{\beta}, \qquad (26.1)$$

где α и β — параметры, характерные для каждой линии и зависящие от выше перечисленных факторов *.

Графически зависимость I от C представлена на рис. 26-1, откуда видно, что с ростом концентрации C интенсивность линии сначала растет пропорционально концентрации, затем рост замедляется, достигая «насыщения». Такой характер за-

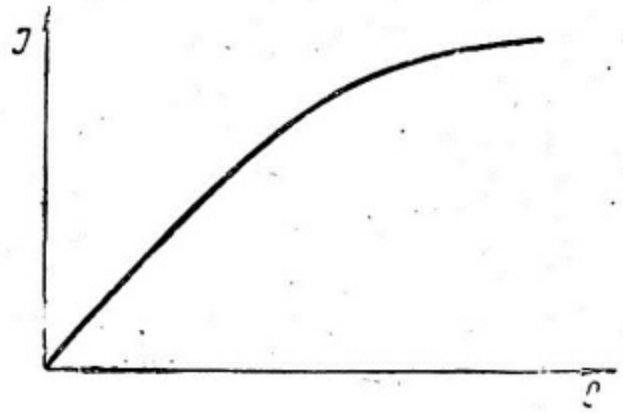

Рис. 26-1

висимости связан с эффектом самопоглощения излучения: с увеличением концентрации C наряду с ростом количества излучающих атомов растет и степень поглощения излучения невозбужденными атомами. В области малых концентраций, где эффект самопоглощения практически отсутствует, можно считать, что параметр β в формуле (26.1) равен единице.

Для определения процентного содержания примеси в некотором сплаве, например, примеси хрома в железе, поступают следующим образом. Прежде всего берут ряд сплавов железа с различными известными концентрациями хрома. Затем, сравнивая интенсивности каких-либо двух спектральных линий, одна из которых принадлежит хрому, другая железу, строят градуировочный график — отношение интенсивностей данных линий в функции концентрации хрома. Определив отношение интенсивностей тех же линий для железа с неизвестной концентрацией хрома, последнюю находят с помощью полученного графика.

---

* Следует, кроме того, иметь в виду, что концентрация исследуемого элемента в сплаве отличается от концентрации в светящихся парах (дуга, искра) из-за различия в скоростях испарения и диффузии атомов различных элементов.

В данной работе сравнение интенсивностей спектральных линий производится визуальным фотометрированием, поэтому метод определения концентрации примеси в этом случае называется методом полуколичественного анализа.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Спектральный анализ в данной работе проводится на стилометре СТ-7, который представляет собой специализированную установку для быстрого качественного и полуколичественного анализа металлов и сплавов.

Стилометр состоит из трех основных частей: искрового генератора ИГ-3, штативного блока и спектрального аппарата.

Искровой генератор ИГ-3 служит источником возбуждения разряда в зазоре между исследуемыми электродами. По существу он представляет собой генератор, работающий по принципу активированной дуги (см. стр. 156). Искровой генератор ИГ-3 может работать в дуговом или искровом режиме. В данной работе он работает в режиме дуги.

Штативный блок служит для установки исследуемых элементов в рабочее положение. Левый электрод *2* (рис. 26-2) закрепляется винтом *3* в электродержателе *1*. Правый электрод *5*

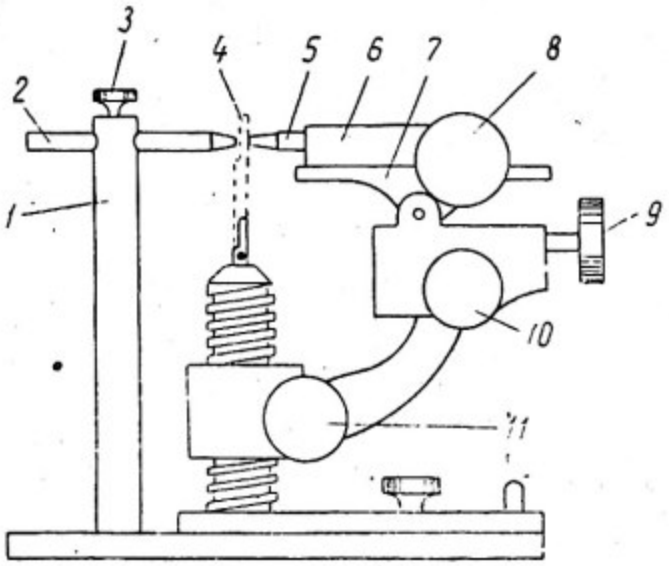

Рис. 26-2

помещается на подъемный столик *7* и зажимается тисками *6* с помощью рукоятки *8*. Выдвигаемый вверх шаблон *4* служит для установки электродов перед их закреплением на определенном расстоянии друг от друга. Рукоятка *9* осуществляет поворот стола вокруг горизонтальной оси, рукоятка *10*—пере-

мещение стола в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, и рукоятка *11* — вертикальный подъем стола.

Штатив расположен в защитном ящике, который поглощает шум при разряде и одновременно экранирует внешнее пространство от высокого напряжения и радиопомех.

Спектральный аппарат предназначен для получения спектра исследуемых сплавов и визуального сравнения интенсивности спектральных линий.

Принципиальная оптическая схема спектрального аппарата показана на рис. 26-3. Здесь свет от исследуемого источника с помощью конденсора освещает входную щель *Щ*, нахо-

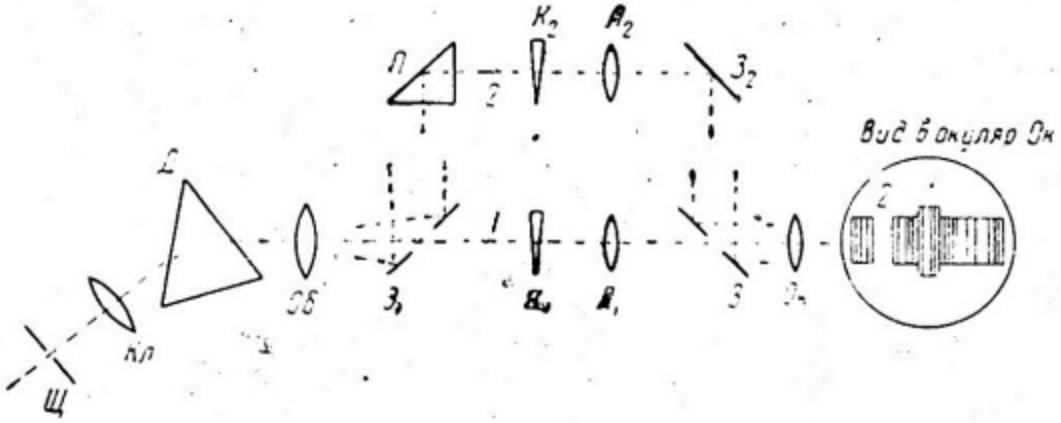

Рис. 26-3

дящуюся в передней фокальной плоскости коллиматорного объектива *Кл*. Из объектива *Кл* свет параллельным пучком падает на систему диспергирующих призм *Д* и разлагается в спектр, изображение которого образуется в фокальной плоскости камерного объектива *Об*, совпадающей с отверстием в центре зеркала $З_1$.

Зеркало $З_1$ расчленяет спектр на две части — пучки *1* и *2*. Пучок *1* проходит через отверстие в зеркале $З_1$, фотометрический клин $К_1$, линзу $Л_1$ и отверстие в зеркале *З*, образуя в центре поля зрения окуляра *Ок* изображение узкого участка спектра, как бы попадающего внутрь центральной рамки. Пучок *2*, отразившись от зеркала $З_1$ и поворотной призмы *П*, проходит затем через фотометрический клин $К_2$, линзу $Л_2$, отражается от зеркала $З_2$ и *З*, образуя в поле зрения окуляра *Ок* изображение длинного участка спектра с пробелом. В результате в окуляре будет наблюдаться картина, изображенная на том же рис. 26-3 справа. Узкий участок спектра в центральной рамке *1'* как раз соответствует пробелу *2'* в длинном участке спектра.

Поворотом диспергирующей призмы *Д* достигается перемещение всего спектра, в результате чего в центральную рам-

ку можно ввести любую спектральную линию. Поворотом призмы *П* можно сместить спектральные линии пучка *2* (вместе с пробелом *2'*) относительно спектра центральной рамки *1'*, так что можно добиться совмещения пробела *2'* с центральной рамкой *1'*, и в поле зрения окуляра будет виден непрерывный участок спектра.

Интенсивность пучков *1* и *2*, а следовательно и соответствующих спектральных участков в поле зрения окуляра, регулируется перемещением фотометрических клиньев K_1 и K_2. Различные участки этих клиньев обеспечивают различную степень ослабления световых пучков.

Внешний вид спектрального аппарата изображен на рис. 26-4. Здесь *Кд* — труба с конденсором и щелью, *Д*—бара-

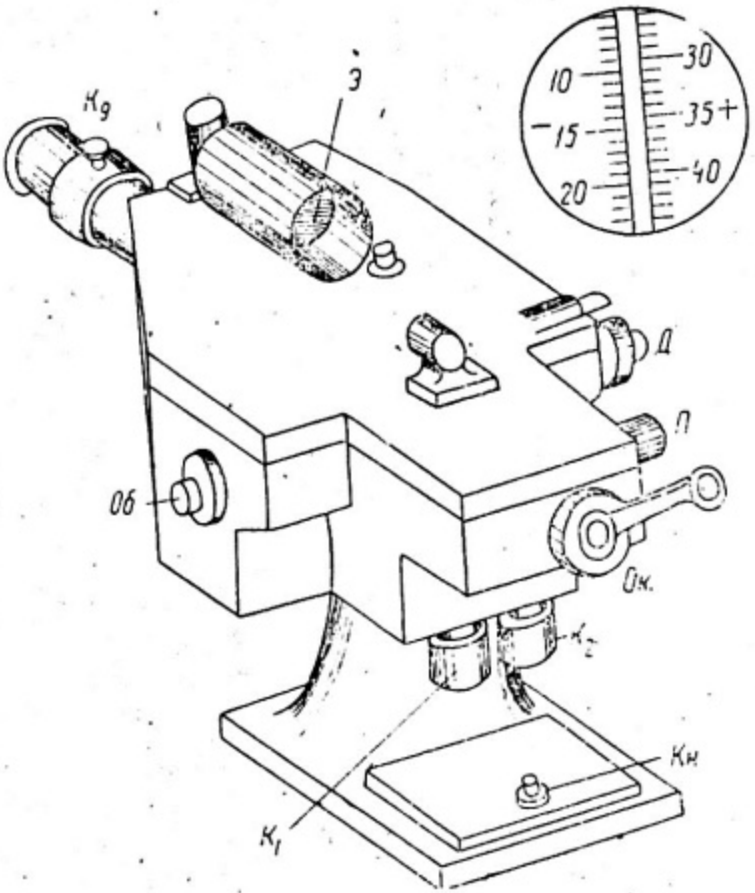

Рис. 26-4

бан, регулирующий положение диспергирующих призм (на барабане имеются две шкалы, позволяющие фиксировать положение спектра в поле зрения окуляра *Ок*), *П* — рукоятка, осуществляющая перемещение поворотной призмы, *Об* — рукоятка, регулирующая положение камерного объектива, K_1 и K_2 — рукоятки смещения фотометрических клиньев.

Положение фотометрических клиньев отсчитывается на экране *Э*. При нажатии кнопки *Кн* на экране *Э* возникает изображение двух шкал, показанных на рис. 26-4 вверху справа. Левая шкала отмечает положение фотометрического клина K_1, правая — положение клина K_2. Мерой относительной интенсивности сравниваемых спектральных линий служит *алгебраическая* сумма отсчетов по обеим шкалам после уравнивания яркостей этих линий (на рисунке эта сумма соответствует + 21).

К установке прилагаются:

1. Дисперсионная кривая стилометра, определяющая зависимость между длиной волны спектральной линии и положением ее по шкале барабана прибора.
2. Атлас спектральных линий железа.
3. Градуировочный график для определения процентного содержания хрома.

Задание

1. Подготовка установки к проведению анализа

Прежде всего необходимо подготовить электроды — один постоянный, другие — исследуемые. Зачистку электродов произвести на наждачном камне, так чтобы их конфигурация соответствовала рис. 26-5.

Затем постоянный электрод поместить в электрододержатель *1* (рис. 26-2), а исследуемый — в тиски *6*. Подняв шаблон *4*, довести до соприкосновения с ним оба электрода, укрепить их винтом *3* и рукояткой *8*, после чего шаблон опустить. Вращением соответствующих ручек штатива добиться соосности обоих электродов.

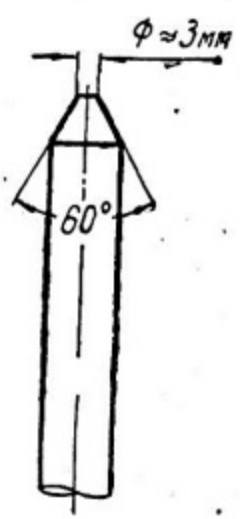

Рис. 26-5

Закрыв дверцы защитного ящика штатива, подключить генератор с сети. После того, как загорится контрольная лампочка, нажать кнопку «пуск»—между электродами зажжется дуга (выключение дуги осуществляется нажатием кнопки «стоп»). При работе дугу следует выключать через 5—10 *мин*, делая паузы в 1—2 *мин*.

Включив генератор, произвести предварительный обжиг электродов в течение 2—3 *мин* для достижения стабильного режима дугового разряда. Сила тока во время обжига, а также в продолжении всего анализа должна составлять 2—3 *а* при напряжении в сети 220 *в*.

Уже в течение обжига рекомендуется приступить к качественному просмотру спектра исследуемого образца, тренируясь при этом в фокусировке линий спектра с помощью ручки *Об* (рис. 26.4) и накатанного кольца окуляра *Ок*, а также в навыке совмещения того или иного участка спектра с центральной рамкой в поле зрения окуляра *Ок* (поворотом барабана *Д*) и перемещения внешнего участка спектра относительно центрального участка (поворотом ручки *П*). При этом рукоятки K_1 и K_2 следует повернуть в крайние положения, соответствующие наибольшей светопропускаемости фотометрических клиньев.

2. Фотометрирование спектральных линий

Вращением накатанного кольца окуляра *Ок* (рис. 26-4) произвести фокусировку рамки поля зрения. Поворотом рукоятки *П* совместить провал в длинном участке спектра с центральной рамкой, в результате чего в поле зрения окуляра будет виден непрерывный участок спектра. Вращением рукоятки *Об*, произвести фокусировку спектральных линий.

После этого определить с помощью дисперсионной кривой стилометра положение по шкале барабана двух сравниваемых линий, линии хрома (5206,0 Å) и линии железа (5227,0 Å).

Установив барабан *Д* в найденное положение, сравнить спектр в окуляре стилометра с атласом спектральных линий железа. Отождествить видимые линии с указанными выше линиями сравнения хрома и железа.

Затем барабаном *Д* подвести линию железа к границе раздела центральной и левой рамок, установив ее *справа* от этой границы, а линию хрома поворотом рукоятки *П* установить *слева* от той же границы. Расстояние между обеими линиями должно быть таким, чтобы удобно было сравнивать их интенсивности.

Вращением рукояток K_1 и K_2 тщательно, уравнять интенсивности сравниваемых линий, после чего, нажав кнопку *Кн*, осветить экран *Э* и записать алгебраическую сумму показаний обеих шкал.

Нарушив равенство интенсивностей вращением рукояток K_1 и K_2, повторить предыдущую операцию не менее семи раз для каждого исследуемого образца.

Вычислить среднее значение алгебраической суммы для каждого образца и по градуировочному графику определить процентное содержание хрома в них.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ТЕХНИКА ОБРАБОТКИ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Для получения фотоснимка экспонированная фотоэмульсия (фотопластинка или фотопленка) должна быть подвергнута фотохимическому процессу — проявлению и закреплению (фиксированию). Процесс проводится в фотокабине или фотоящике при слабом красном освещении *.

Обычно используют три кюветы-ванночки: одна с проявителем, другая с закрепителем (фиксажем) и третья с водой для промывки. Кюветы располагают в следующем порядке: проявитель, вода, закрепитель. Кювета с проявителем должна находиться не очень близко от красного фонаря во избежание засвечивания фотоэмульсии.

Проявление. Вынув экспонированную пленку из кассеты, погружают ее затем с помощью пинцета в кювету с проявителем (эмульсией кверху) так, чтобы проявитель покрыл всю эмульсию. При образовании пузырьков на поверхности пленки по ним следует провести стеклянной палочкой. Во время проявления кювету надо слегка покачивать для непрерывной циркуляции проявителя по поверхности эмульсии. Время проявления задается преподавателем.

После проявления пленку переносят в кювету с водой и тщательно промывают.

Закрепление. Затем пленку с помощью пинцета переносят в кювету с закрепителем (по-прежнему эмульсией кверху). Процесс фиксирования необходимо вести до полного исчезновения беловатого налета на поверхности пленки, обращенной к подложке. Для ускорения процесса фиксирования кювету с закрепителем также следует слегка покачивать.

Спустя 2—3 минуты после полного исчезновения беловатого налета пленку вынимают из закрепителя и в течение 5 минут тщательно промывают в проточной воде. Затем промытую пленку переносят в сушильный шкаф, где она должна

* Применяемые в наших работах фотоматериалы к красной области спектра нечувствительны.

находиться при слегка приоткрытой дверце до полного отвердевания эмульсионного слоя.

Замечание. Во избежание загрязнения и повреждения эмульсионного слоя необходимо проявлять максимальную осторожность при обращении с ним. Не рекомендуется, в частности, трогать пленку (пластинку) руками со стороны эмульсии.

2. Длины волн видимой части спектра

Цвет	Диапазон, спектра, Å
Фиолетовый	3800—4500
Синий	4500—4800
Голубой	4800—5100
Зеленый	5100—5500
Желто-зеленый	5500—5750
Желтый	5750—5850
Оранжевый	5850—6200
Красный	6200—7600

3. Универсальные физические константы

Скорость света в вакууме	$c = 2{,}99793 \cdot 10^{10}$ *см/сек.*
Число Авогадро	$N = 6{,}024 \cdot 10^{23}$ *моль*$^{-1}$.
Число Лошмидта	$n_0 = 2{,}687 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$.
Универсальная газовая постоянная .	$R = 8{,}314 \cdot 10^{7}$ *эрг/град·моль.*
	$= 1{,}987$ *кал/град·моль..*
	$= 0{,}082$ *л-атм/град·моль*
Объем грамм-молекулы идеального газа при нормальных условиях . .	$V_0 = 22{,}42$ *л/моль.*
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}380 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град.*
Элементарный заряд	$e = 4{,}803 \cdot 10^{-10}$ *СГСЕ.*
	$= 1{,}602 \cdot 10^{-20}$ *СГСМ.*
Масса электрона	$m = 9{,}108 \cdot 10^{-28}$ *г.*
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m} = 5{,}273 \cdot 10^{17}$ *СГСЕ/г.*
Число Фарадея	$F = 96520$ *кул/г-экв.*
	$= 2{,}894 \cdot 10^{14}$ *СГСЕ/г-экв.*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Методические указания 5

1. Изучение рассеянного отражения света 7
2. Определение характеристик фотоэмульсии 11
3. Изучение разрешающей способности фотоэмульсии 19
4. Изучение поглощения света в твердом теле 24
5. Определение зависимости показателя преломления призмы от длины световой волны 29
6. Определение фокусных расстояний и увеличения телеобъектива 36
7. Изучение зрительной трубы и телескопа Максутова 43
8. Изучение аберраций плоско-выпуклой линзы 49
9. Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля 56
10. Определение длины световой волны с помощью колец Ньютона 63
11. Измерение микронеровностей поверхности интерференционным методом 70
12. Интерференционный метод определения показателя преломления воздуха 78
13. Изучение метода фазового контраста 84
14. Изучение дифракции Фраунгофера от щели 92
15. Изучение прозрачной дифракционной решетки 100
16. Изучение отражательной дифракционной решетки 106
17. Исследование дифракции света на ультразвуке 112
18. Исследование разрешающей способности объектива зрительной трубы 118
19. Изучение явления поляризации света 124
20. Изучение явления искусственной оптической анизотропии при механических деформациях 130

175

21. Изучение явления естественного вращения плоскости поляризации света 137
22. Изучение вращения плоскости поляризации света в магнитном поле 142
23. Градуировка монохроматора 157
24. Определение спектральных характеристик призменного спектрографа 153
25. Изучение приемов качественного спектрального анализа . . . 161
26. Полуколичественный спектральный анализ на стилометре . . 166
Приложения 173

Подп. к печ. 10/I-62 г. Объем 11 п. л. Зак. 684. Тир. 1200 экз.
Типография МИФИ, М. Пионерская, 12.