

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

*ОПТИКА*

Под редакцией доцента Ф. Д. Кочанова

Рассмотрен и утвержден редакционным советом института  
18 марта 1969 года

КУЙБЫШЕВ 1969

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

### О П Т И К А

Редактор *А. И. Кондратьева*

Технический редактор *И. С. Колышева*

Корректор *Е. М. Кошкина*

---

ЕО04566. Подписано в печать 9/X 1969 г. Объем 8,5 печ. л.  
Тираж 2000 экз. Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Цена 45 коп.

---

Куйбышевский авиационный институт им. С. П. Королева, г. Куйбышев,  
ул. Молодогвардейская, 151.

---

Областная типография им. Мяги управления по печати при Куйбышевском  
облсполкоме, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60. Заказ № 3114.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Это руководство предназначено для студентов второго курса, выполняющих лабораторные работы по общей физике в учебной оптической лаборатории Куйбышевского авиационного института. В нем описаны девятнадцать лабораторных работ. В каждой работе даны краткая теория, формулировка экспериментальной задачи, описание приборов и методов измерения, указания о порядке выполнения опыта и о форме отчета, а также контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Изучая теоретическую часть работы, студент обязательно должен воспользоваться хотя бы одним учебным пособием из числа указанных в списке литературы.

Непосредственное участие в составлении практикума приняли ст. преподаватель Л. А. Башкирцева (24), доцент Т. И. Грачева (3, 9, 14), ст. преподаватель А. М. Кожевников (21), ассистент В. А. Корюкин (23), доцент Ф. Д. Кочанов (4, 8, 9, 10, 11, 13, 21, 24), ассистент З. А. Куликова (1, 3, 17, 22), доцент П. П. Литвиненко (19), ст. преподаватель А. Н. Савина (2, 5, 6, 13, 14, 15, 24), доцент С. А. Санталова (5, 8, 9, 15, 19, 23), ассистент В. П. Тимофеева (4, 6, 10, 21, 22).

Особенно большую работу по составлению пособия и подготовке его к печати проделала ст. преподаватель А. Н. Савина — руководитель учебной оптической лаборатории.

Следует заметить, что в данный выпуск руководства вошли не все описания лабораторных работ по оптике, подготовленных в лаборатории. Этим и объясняется некоторая непоследовательность в номерах лабораторных работ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА ПРИ ПОМОЩИ МИКРОСКОПА

**Принадлежности:** микроскоп с микрометрическим винтом, стеклянная пластинка с царапкой на одной ее поверхности, чистая пластинка или несколько таких пластинок из исследуемых сортов стекла, пластинка из исследуемого стекла с метками на обеих поверхностях, сделанных одна над другой, микрометр для измерения толщины стеклянной пластинки.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Луч света, переходя из одной среды в другую, преломляется на поверхности их раздела так, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления оказывается постоянным для двух изотропных сред. Эта величина называется *относительным показателем преломления второй среды относительно первой*.

Показатель преломления данной среды относительно вакуума называется ее *абсолютным показателем преломления*. Мы будем его называть просто показателем преломления. Показатель преломления воздуха очень близок к единице, а поэтому показатель преломления какой-либо среды относительно воздуха почти не отличается от абсолютного показателя преломления. В работе определяется показатель преломления стекла относительно воздуха.

Если смотреть сверху на предмет, находящийся под стеклянной пластинкой, то из-за преломления света он кажется несколько поднятым.

Установим связь между показателем преломления стекла  $n$ , толщиной пластинки  $d$  и величиной  $a$  кажущегося поднятия точки  $S$  предмета, находящейся в соприкосновении с нижней поверхно-

стью пластинки. При этом будем предполагать, что глаз находится на той же нормали к плоскости пластинки, что и точка  $S$ . Рассмотрим ход лучей  $SB$  и  $SD$ , направленных из точки  $S$  под малым углом  $r$  к нормали по разные ее стороны (рис. 1).

Преломившись в точках  $B$  и  $D$ , они выходят в воздух под углом  $i$ , определяемым уравнением:

$$\sin i = n \cdot \sin r. \quad (1)$$

Наблюдателю кажется, что рассматриваемые лучи, а также другие близкие к нормали лучи исходят из точки  $S'$ , т. е. точка  $S$  кажется приподнятой. Интересующая нас величина поднятия  $a$  равна разности  $AS - AS'$ .

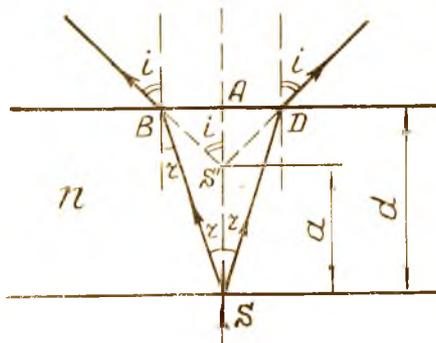


Рис. 1

Из треугольников  $ABS$  и  $ABS'$  следует:

$$AB = AS' \cdot \operatorname{tg} i \quad \text{и} \quad AB = AS \cdot \operatorname{tg} r = d \cdot \operatorname{tg} r,$$

откуда  $AS' \cdot \operatorname{tg} i = d \cdot \operatorname{tg} r$ , т. е.

$$\frac{d}{AS'} = \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r} = \frac{d}{d-a}.$$

При малых углах  $i$  и  $r$  отношение их тангенсов может быть заменено отношением синусов:

$$\frac{d}{d-a} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Воспользовавшись уравнением (1), получаем:

$$\frac{d}{d-a} = n. \quad (2)$$

Таким образом, зная толщину пластинки  $d$  и величину кажущегося поднятия  $a$ , можно определить показатель преломления  $n$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Определение кажущегося поднятия производится при помощи микроскопа, имеющего микрометрический винт для точного перемещения тубуса.

Рассмотрим два способа определения величины  $(d-a)$ .

1. Под объектив микроскопа кладется пластинка с меткой (парафинкой). Получив резкое изображение метки, накрывают эту пластинку исследуемой пластинкой и путем перемещения тубуса вверх восстанавливают резкость изображения. Разность отсчетов обоих положений тубуса равна кажущемуся поднятию объекта  $a$ . Величину  $d$  определяют с помощью микрометра.

Показатель преломления вычисляют по формуле (2). Каждое деление на диске микроскопа соответствует 0,04 мм. Измерение производится не менее пяти раз в различных местах исследуемой пластинки.

2. На предметный столик микроскопа кладется пластинка из исследуемого стекла, на обеих поверхностях ее нанесены одна над другой маленькие метки.

Получив резкое изображение сначала верхней, а затем нижней метки, по перемещению тубуса микроскопа определяют расстояние  $d-a$  и по формуле (2) — показатель преломления стекла.

Максимальная точность результата достигается тогда, когда микроскопический объект находится в центральной части поля зрения. Все результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

	Первый способ			Второй способ		
	Толщина пластинки $d$	Перемещение $a$	Показатель преломления $n = \frac{d}{d-a}$	Толщина пластинки $d$	Перемещение $h = d - a$	Показатель преломления $n = \frac{d}{d-a}$
1						
2						
3						
4						
5						

Средний результат измерений по первому способу:

Средний результат измерений по второму способу:

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные законы геометрической оптики.
2. Как связаны показатель преломления среды и скорость распространения света в ней?
3. Почему при рассмотрении предмета через плоскую стеклянную пластинку он кажется расположенным ближе?
4. При каком условии справедлива формула (2)?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Савельев, Курс общей физики, т. III, М., изд. «Наука», 1966, § 1.
2. А. В. Кортнев и др. Практикум по физике, М., изд. «Высшая школа», 1963, гл. 22.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА

Принадлежности: рефрактометр РЛ-2, весы, разновес, мензурка, дистиллированная вода, соль, исследуемый раствор соли, химические стаканы, стеклянная палочка.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В данной работе предлагается определить концентрацию исследуемого раствора соли NaCl.

Концентрация — величина, выражающая содержание (количество) данного компонента в определенном количестве смеси, и ее можно выразить как отношение весовых количеств компонентов друг к другу.

В одном из методов определения концентрации используется зависимость показателя преломления раствора от его концентрации. Показатель преломления водных растворов ряда солей при 18°C и длине волны 5893 Å (Na) может быть выражен следующей формулой:

$$n = 1,332 + (A \cdot C - B \cdot C^2),$$

где  $C$  — концентрация раствора,  $A$  и  $B$  — постоянные, характерные для каждой соли (для NaCl  $A = 0,00176$ ,  $B = 0,0000088$ ).

Методы физико-химического исследования веществ, основанные на измерении показателя преломления, называются рефрактометрией. В рефрактометрии измеряют показатель преломления раствора определяемого компонента с помощью приборов, называемых рефрактометрами. Концентрацию находят по калибровочной кривой. Метод обладает высокой чувствительностью и точностью (до 0,01—0,1%). Для анализа достаточно двух-трех капель раствора.

## ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Рефрактометры — приборы для измерения показателя преломления света  $n$  различных сред.

На рис. 1 показана оптическая схема рефрактометра РЛ-2, где 1 — осветительное зеркало, 2 — вспомогательная откидная призма, 3 — основная призма с высоким показателем преломления

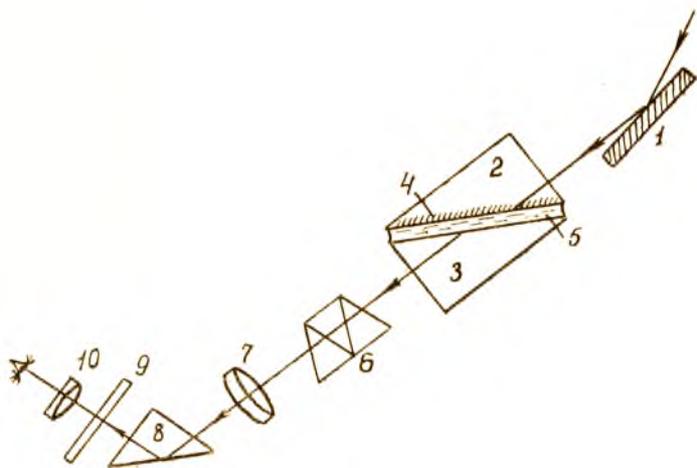


Рис. 1

4 — матированная грань откидной призмы, 5 — исследуемая жидкость, 6 — призма компенсатора, 7 — объектив зрительной трубы, 8 — поворотная призма, 9 — шкала, 10 — окуляр зрительной трубы.

Данный рефрактометр предназначен для измерения показателей преломления света твердых или жидких тел. Исследуемые жидкости, показатель преломления которых меньше показателя преломления основной призмы, помещаются в зазор (около 0,1 мм) между полированной гипотенузной гранью основной призмы и матированной гипотенузной гранью вспомогательной призмы.

Специальный компенсатор (призма прямого зрения 6) позволяет компенсировать дисперсию призм 2—3 и работать с источником белого света.

Шкала для отсчета показателей преломления видна непосредственно в поле зрения окуляра вместе с границей раздела света и тени.

Рассмотрим кратко действие прибора. Пусть свет проходит через грань  $A'D'$  вспомогательной призмы  $A'B'D'$  и попадает на поверхность  $A'B'$  (рис. 2).

Так как грань  $A'B'$  матовая, то она становится источником световых лучей всевозможных направлений (1, 2, 3, ...).

В нашем приборе толщина слоя жидкости значительно меньше геометрических размеров самих призм. Поэтому в любой точке на границе  $AB$  падающие из жидкости лучи будут иметь углы паде-

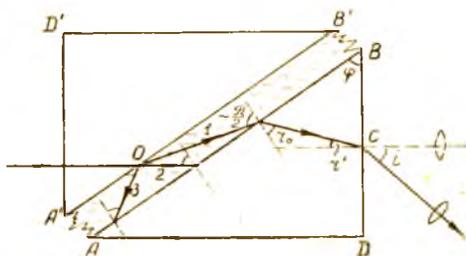


Рис. 2

ния от  $0^\circ$  до  $\frac{\pi}{2}$ . На границе раздела «жидкость—стекло», свет будет частично отражаться, а частично преломляться. Отраженные лучи пойдут обратно в жидкость, а преломленные — в стекло нижней призмы. Углы преломления лучей в стекле будут также всевозможными, но в пределах от  $0^\circ$  до  $r_0$ . Самый большой угол преломления  $r_0$  будет для лучей, падающих на границу раздела под углами, близкими к  $\frac{\pi}{2}$ . Угол  $r_0$  называется *предельным углом преломления*.

Для предельного угла преломления на границе раздела (жидкость — стекло), справедливо соотношение:

$$\frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\sin r_0} = \frac{N}{n} \quad \text{или} \quad n = N \sin r_0, \quad (1)$$

где  $N$  и  $n$  — показатели преломления стекла нижней призмы и жидкости.

На грань  $BD$  нижней призмы со стороны стекла будут падать лучи под всевозможными углами, но не меньше угла  $r'$ . Угол падения  $r'$  образуется теми лучами, которые на границе «жидкость—стекло» преломляются под углом  $r_0$ . На границе раздела  $BD$  лучи также отражаются и преломляются. При этом лучи, падающие на грань  $BD$  под углом  $r'$ , будут выходить в воздух, образуя с нормалью к  $BD$  минимальный угол  $i$ . Все другие лучи будут выходить в воздух под углами в пределах от  $i$  до  $\frac{\pi}{2}$ .

На границе «стекло — воздух» имеем:

$$\frac{\sin r'}{\sin i} = \frac{1}{N} \quad \text{или} \quad \sin i = N \sin r', \quad (2)$$

Из рис. 2 следует, что  $r_0 + r' = \varphi$  или

$$r_0 = \varphi - r'. \quad (3)$$

Подставив значение  $r_0$  из (3) в уравнение (1), будем иметь:

$$n = N (\sin \varphi \cos r' - \cos \varphi \cdot \sin r'). \quad (4)$$

Из (2) имеем:  $\sin r' = \frac{\sin i}{N}$ , а  $\cos r' = \frac{1}{N} \sqrt{N^2 - \sin^2 i}$ .

Подставив значения  $\sin r'$  и  $\cos r'$  в (4), получим:

$$n = \sin \varphi \cdot \sqrt{N^2 - \sin^2 i} - \cos \varphi \cdot \sin i. \quad (5)$$

Для данного прибора  $N$  и угол основной призмы  $\varphi$  являются постоянными. Измеряя величину угла  $i$ , легко подсчитать показатель преломления исследуемой жидкости по формуле (5).

Каждому значению угла  $i$  соответствует строго определенное значение показателя преломления жидкости. Поэтому шкала прибора градуируется так, что по ней можно непосредственно отсчитывать показатели преломления различных жидкостей.

Рассматривая грань  $BD$  через зрительную трубу, видим различные картины в зависимости от ориентации оптической оси трубы относительно нормали к  $BD$ . Если оптическая ось трубы совпадает с направлением нормали к  $BD$ , то ни один луч, прошедший через жидкость, не попадает в объектив зрительной трубы и грань  $BD$  будет казаться темной.

Если оптическая ось трубы будет составлять с нормалью к грани  $BD$  тот же угол  $i$ , что и выходящие в воздух лучи, преломляющиеся на границе «жидкость—стекло» под предельным углом  $i_0$ , то поле зрения окуляра окажется разделенным на два сектора — светлый и темный. Изображение участков грани  $BD$ , расположенных выше точки  $C$  (рис. 2), будет светлым, так как на них углы преломления выходящих из призмы лучей больше  $i$ . От участков, расположенных ниже точки  $C$ , в зрительную трубу должны были бы попадать только лучи, выходящие под углами, меньшими  $i$ , а так как такие лучи из призмы не выходят, то изображение этих участков получается темным.

Если угол между оптической осью трубы и нормалью к  $BD$  увеличивать, то величина темного сектора будет уменьшаться.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Отмерить мензуркой 100  $см^3$  дистиллированной воды.
2. Взвесить на весах 5 порций соли  $NaCl$  по 5 г.
3. Направить свет с помощью зеркала на вспомогательную призму.
4. Откинуть в сторону верхнюю призму, протереть грани призм и конец стеклянной палочки. Палочкой нанести каплю дистиллированной воды на грань измерительной призмы. Закрывать верхнюю призму.
5. Вращая маховичок компенсатора, добиться уничтожения окраски граничной линии света и тени.

6. Перемещая трубу, установить середину поля зрения трубы, отмеченную тремя штрихами, на границу раздела света и тени и произвести отсчет показателя преломления по шкале с точностью до 3-го знака после запятой.

7. Опустить в воду одну порцию соли; тщательно растворив ее, определить  $n$ . Увеличивая концентрацию раствора путем добавления и растворения последующих порций соли, определить соответствующие показатели преломления  $n_1, n_2, n_3, \dots$

Перед каждым новым измерением  $n$  очищать грани призм от растворов предыдущих измерений. Полученные результаты записать в таблицу.

Концентрация раствора в %	0%	5%	10%	15%	20%	25%
$n$						

8. По полученным результатам измерений построить график зависимости  $n$  от концентрации раствора.

9. Измерить показатель преломления исследуемого раствора той же соли и по графику определить его концентрацию.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение термина «концентрация раствора».
2. В чем различие между абсолютным и относительным показателями преломления?
3. Объяснить принцип действия рефрактометра РЛ-2.
4. Каково назначение компенсатора в рефрактометре Левни? Принцип его действия.
5. Как связаны между собою показатель преломления исследуемой жидкости и предельный угол выхода  $i$ ?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический энциклопедический словарь, т. I, изд. «Советская энциклопедия», 1960.
2. А. В. Кортнев, Ю. Б. Рублев, А. И. Куденко. Практикум по физике. М., изд. «Высшая школа», 1963, работа № 64.
3. Физический практикум, под редакцией В. И. Ивероновой. Физматгиз, 1962, задача 104.
4. Г. А. Зисман, О. М. Тодес. Курс общей физики. М., изд. «Наука», т. 3, 1965, § 5.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА ЛИНЗЫ

Принадлежности: оптическая скамья, источник света, ванна с линзой, экран.

## КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В оптике часто пользуются термином — тонкая линза. Линзу считают тонкой, если толщина ее  $AB$  мала по сравнению с радиусами ограничивающих поверхностей  $R_1 = O_1B$ ,  $R_2 = O_2A$  и с расстояниями  $a_1 = AS$ ,  $a_2 = BF$  (рис. 1).

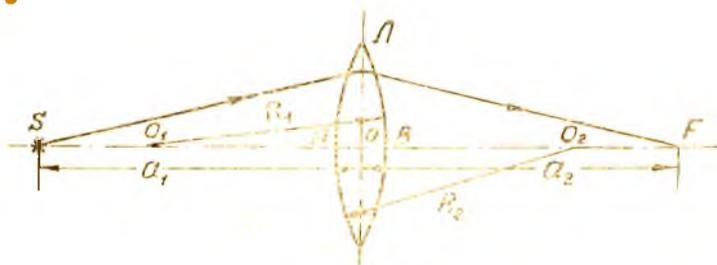


Рис. 1

Для тонкой линзы справедлива формула

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \left( \frac{n}{n_1} - 1 \right) \left( -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления вещества линзы,  $n_1$  — показатель преломления среды, в которую погружена линза.

Эта формула имеет общий характер и пригодна для всех типов тонких линз. Необходимо лишь иметь в виду, что все расстояния

отсчитываемые по направлению распространения света, считаются положительными.

Если светящаяся точка, лежащая на главной оси, удаляется от линзы, то ее изображение, напротив, приближается к линзе, стремясь к некоторому предельному положению. Точка на главной оптической оси, в которой получается изображение бесконечно удаленного источника, называется *главным фокусом линзы*, а расстояние от главного фокуса до линзы — *главным фокусным расстоянием*.

Так как пучок лучей от бесконечно удаленного точечного источника можно считать параллельным, то можно также сказать, что главным фокусом называется точка, в которой сходится пучок лучей, падающих на линзу параллельно главной оптической оси.

Полагая в формуле (1)  $a_1 = \infty$  получим  $a_2 = F$  и, наоборот, полагая  $(a_2) = \infty$ , будем иметь  $(a_1) = F$ . Как в том, так и в другом случае имеем:

$$F = \frac{1}{\left(\frac{n}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}. \quad (2)$$

Следует обратить внимание на то, что фокусное расстояние линзы зависит от свойств среды, в которой она находится. Если определить фокусное расстояние линзы в воздухе ( $n_1 = 1$ ), а затем поместить ее в другую среду, например, в воду ( $n_1 = \frac{4}{3}$ ) и также измерить фокусное расстояние, то, подставляя полученные данные в формулу (2), можно вычислить показатель преломления материала линзы  $n$ .

Одним из способов определения фокусного расстояния линзы является способ Бесселя, которым мы будем пользоваться в данной работе. Рассмотрим его.

Формулу (1) тонкой двояковыпуклой линзы можно переписать в следующем виде:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{F}, \quad (3)$$

где  $a_1, a_2, F$  берутся по абсолютной величине.

Если расстояние  $D$  между экраном и предметом больше четырех фокусных расстояний ( $D > 4F$ ), то можно найти два положения линзы, при которых на экране получаются отчетливые изображения предмета: в одном случае уменьшенное, в другом — увеличенное. Обозначим расстояние между этими двумя положениями линзы буквой  $d$  (рис. 2).

Пусть при положении I линзы получилось резкое увеличенное изображение предмета. Обозначим расстояние от линзы до предмета  $a_1$  и от линзы до изображения  $a_2$ . Теперь при неизменном положении источника и экрана передвинем линзу в положение II, в котором получается резкое уменьшенное изображение предмета.

Тогда (как это показано на рис. 2), получается, что  $a'_1 = a_1$  и  $a'_2 = a_2$ . Из рис. 2 также видно, что

$$a_1 = \frac{D}{2} - \frac{d}{2}, \quad a_2 = \frac{D}{2} + \frac{d}{2}. \quad (4)$$

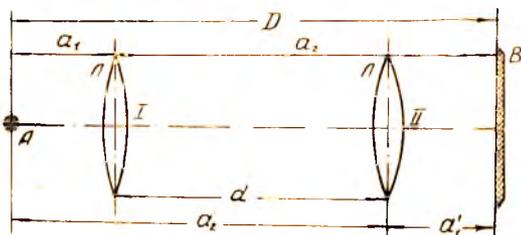


Рис. 2

Подставляя эти выражения в формулу (3), получим:

$$F = \frac{(D + d)(D - d)}{4D}. \quad (5)$$

Таким образом, измерив расстояние от источника до экрана  $D$  и смещение линзы  $d$ , можно определить фокусное расстояние линзы.

#### УСТАНОВКА ПРИБОРОВ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Схема установки изображена на рис. 3. Источник света  $S$  освещает матовую пластинку  $A$ , на которой нанесены две пересекающиеся прямые линии — крест.

Линза  $L$ , помещенная в стеклянную ванночку с плоскопараллельными стенками, дает изображение этого креста на экране  $B$ . Работа выполняется в следующем порядке.

1. Перемещая линзу  $L$  и экран  $B$ , найти такое положение последнего, при котором можно получить на нем как увеличенное, так и уменьшенное изображение креста.

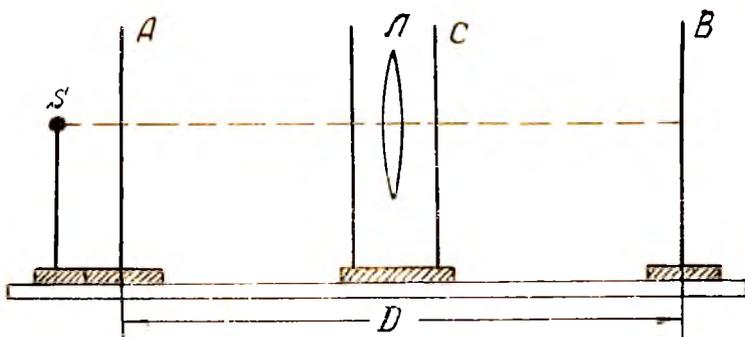


Рис. 3

2. Отрегулировать по высоте пластинку  $A$ , линзу  $L$  и экран  $B$  так, чтобы изображение точки пересечения линий, нанесенных на пластинку  $A$ , получилось посередине экрана  $B$ .

3. Определить фокусное расстояние линзы  $L$  по способу Бесселя.

4. Наполнить ванну водой. Найти снова такое положение экрана  $B$ , чтобы на нем можно было получить два изображения предмета. Определить расстояния  $D^1$  и  $d^1$ .

5. Вычислить фокусное расстояние линзы в воде. При этом нужно учесть поправки по формулам (6), вывод которых приведен ниже.

6. Подставляя в формулу (2) данные первого и второго опытов и решая совместно полученные таким образом уравнения, вычислить показатель преломления  $n$  стекла линзы.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОПРАВОК

Ввиду того, что во втором опыте путь, проходимый световыми лучами, частично лежит не в воде, а в воздухе, при определении расстояний  $D$  и  $d$  для воды нужно ввести поправку.

Пусть на рис. 4 точки  $A$  и  $B$  — положения источника и изображения. Применение формулы (2) предполагает, что все пространство между источником и экраном заполнено водой. Чтобы в этом случае осуществить такой же ход лучей в ванне, какой мы получали в опыте, нужно источник поместить в точку  $A^1$ , причем изображение получится в точке  $B^1$ .

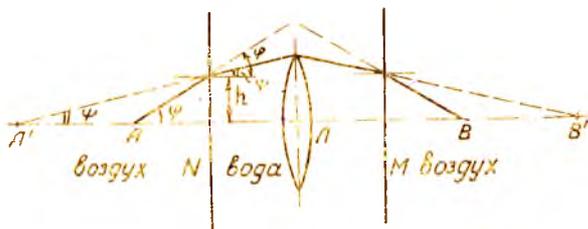


Рис. 4

Таким образом, вместо расстояний  $NA$  и  $MB$  при расчете мы должны взять расстояния  $NA^1$  и  $MB^1$ . Из чертежа видно:

$$\frac{h}{NA} = \operatorname{tg} \varphi; \quad \frac{h}{NA^1} = \operatorname{tg} \psi.$$

По закону преломления света:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_1,$$

где  $n_1$  — показатель преломления воды ( $n_1 = \frac{4}{3}$ ).

Ввиду малости углов  $\varphi$  и  $\varphi'$ , можно их тангенсы заменить синусами. Тогда получается:

$$\frac{NA'}{NA} = \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi'} = n_1; \quad NA' = n_1 NA.$$

Аналогично находим:  $MB' = n_1 MB$

Смещение линзы  $d'$ , измеренное в воздухе, также следует умножить на показатель преломления воды. Таким образом, расстояния  $D$  и  $d$  для воды равны:

$$D = n_1 (NA + MB) + NM,$$

$$d = n_1 d'.$$

Таблица измерений

№ п/п	I опыт Измерения с линзой в воздухе			II опыт Измерения с линзой в воде					n
	D	d	F <sub>1</sub>	D'	d'	D	d	F <sub>2</sub>	
				без поправок		с поправкой			
I									
II									
III									
Среднее значение									

### Контрольные вопросы

1. Почему при определении фокусного расстояния линзы способом Бесселя расстояние от источника до изображения должно быть больше  $4F$ ?

Что будет, если  $D=4F$ ?  $D<4F$ ?

Проверьте на опыте.

2. Какие линзы называются тонкими?

3. Какова зависимость фокусного расстояния линзы от показателя преломления окружающей среды?

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1967, § 11, 12.

2. А. В. Кортнев и др. Практикум по физике, М., изд. «Высшая школа», 1963, работа № 60.

## СРАВНЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА ДВУХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОВОГО ПОЛЯ ОДНОЙ ИЗ НИХ С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА ЛЮММЕРА—БРОДХУНА

**Принадлежности:** оптическая скамья, фотометр Люммера-Бродхуна, лампы сравнения, испытываемая лампа.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим основные понятия и величины фотометрии.

**Поток лучистой энергии. Световой поток.** Представим себе источник света  $L$  настолько малых размеров, чтобы на некотором расстоянии  $r$  от него можно было считать волновую поверхность сферической. Такой источник обычно называют точечным. На пути лучистой энергии, идущей от него, расположим какую-нибудь малую площадку  $\Delta\sigma$  и измерим количество энергии  $\Delta E$ , протекающей через нее за время  $\Delta t$  (рис. 1).

Отношение

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (1)$$

показывающее, какое количество энергии протекает через элемент поверхности  $\Delta\sigma$  за единицу времени, есть поток лучистой энергии через этот элемент. В Международной системе единиц поток лучистой энергии измеряется в  $\frac{\text{дж}}{\text{сек}}$ .

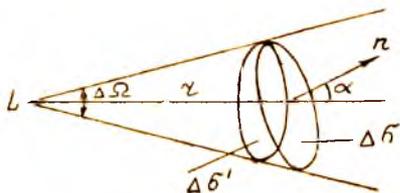


Рис. 1.

Часто лучистую энергию измеряют по действию, которое она производит на человеческий глаз, играющий исключительно важную роль при количественных оценках света. В связи с этим вводится понятие о световом потоке. Световой поток — это поток лучистой энергии, оцениваемой по зрительному ощущению. Он измеряется в особых единицах — люменах.

Так как лучистая энергия в однородной среде распространяется прямолинейно, то поток света, проходящий через элемент  $\Delta\sigma$ , представляет собой конус с вершиной в источнике  $L$ .

Спроектируем площадку  $\Delta\sigma$  на направление, перпендикулярное оси конуса. Мы получим площадку

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma \cdot \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол, составляемый нормалью к поверхности  $\Delta\sigma$  с осью конуса. Если мы примем площадку  $\Delta\sigma'$  за элемент сферы радиуса  $r$  с центром в точке  $L$ , то отношение  $\frac{\Delta\sigma'}{r^2}$  даст нам величину телесного угла  $\Delta\Omega$ , в котором заключен рассматриваемый нами световой поток.

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta\sigma'}{r^2} = \frac{\Delta\sigma \cdot \cos \alpha}{r^2}, \quad (2)$$

**Сила света.** Силой света  $I$  источника называют величину светового потока, приходящегося на единицу телесного угла.

Если поток  $\Phi$ , посылаемый нашим источником, равномерен, т. е. сила света источника одинакова во всех направлениях, то

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (3)$$

где  $\Phi$  — полный световой поток, посылаемый источником, а  $4\pi$  — полный телесный угол.

В случае неравномерного потока величина  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}$  представляет собой лишь среднее значение  $I$  и называется средней сферической силой света. Для определения истинной силы света источника по какому-либо направлению надо выделить элементарный телесный угол  $\Delta\Omega$  вдоль этого направления и измерить световой поток  $\Delta\Phi$ , приходящийся на него. Предел отношения  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}$  при  $\Delta\Omega$ , стремящемся к нулю, и дает истинную силу света в данном направлении, т. е.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (4)$$

**Освещенность.** Освещенностью  $E$  называется величина светового потока, приходящегося на единицу площади освещаемой поверхности. Так, освещенность площади  $\Delta\sigma$  в нашем примере есть

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma} = \frac{I \cdot \Delta\Omega}{\Delta\sigma} = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (5)$$

Полученное выражение показывает, что освещенность, создаваемая точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности и прямо пропорциональна косинусу угла, составляемого направлением световых лучей с нормалью к освещаемой поверхности. Это есть основной закон освещенности для точечного источника света.

**Светимость.** Протяженный источник света характеризуют светимостью  $R$  различных его участков, под которой понимается световой поток, испускаемый с единицы поверхности источника наружу по всем направлениям (внутри телесного угла  $2\pi$ ).

$$R = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (6)$$

**Яркость.** Для характеристики излучения (отражения) света поверхностью в заданном направлении служит яркость  $B$ . Яркость определяют как отношение силы света элемента излучающей поверхности  $\Delta S$  в данном направлении к проекции площади этого элемента на плоскость, перпендикулярную к взятому направлению.

Пусть величина элемента излучающей поверхности равна  $\Delta S$ , сила света по данному направлению —  $I_\varphi$  и угол между нормалью  $N$  к поверхности и выбранным направлением —  $\varphi$  (рис. 2), тогда

$$B = \frac{I_\varphi}{\Delta S \cos \varphi}. \quad (7)$$

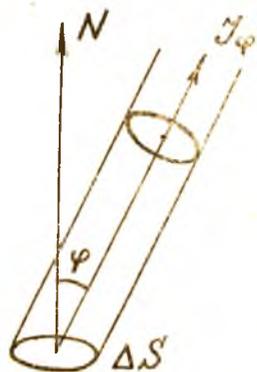


Рис. 2

### Единицы измерения световых величин

Для измерения световых величин установлены следующие единицы.

Единица силы света — свеча (*св*), равная  $1/60$  силы света, излучаемого в направлении нормали с  $1 \text{ см}^2$  полного излучателя при температуре затвердевания платины. Полным излучателем называют абсолютно черное тело. Свеча является одной из основных единиц Международной системы.

Единица светового потока — люмен (*лм*) есть световой поток, который излучает точечный изотропный источник силой света в  $1 \text{ св}$  в телесный угол, равный  $1$  стерadianу.

Единица освещенности — люкс (*лк*) есть освещенность, создаваемая световым потоком в  $1 \text{ лм}$  при равномерном распределении его на площади в  $1 \text{ м}^2$ .

Применяется также единица освещенности — *фот*, соответствующая потоку в 1 *лм*, равномерно распределенному на площади в 1 *см*<sup>2</sup> 1 *фот* = 10<sup>4</sup> *лк*.

Светимость измеряется в тех же единицах, что и освещенность.

Единица яркости — *нит* (*нт*) есть яркость одинаково светящейся плоской поверхности, дающей силу света в одну свечу с каждого квадратного метра, в направлении, перпендикулярном к этой поверхности.

Раньше применялась также единица яркости — *стильб* (*сб*), равная 1  $\frac{св}{см^2}$  1 *сб* = 10<sup>4</sup> *нт*.

## ПРИНЦИПЫ ФОТОМЕТРИИ

Для сравнения различных источников света мы пользуемся обычно глазом, он хорошо устанавливает равенство освещенности двух каких-нибудь соприкасающихся поверхностей, но плохо непосредственно оценивает, во сколько раз освещенность одной поверхности больше освещенности другой. Поэтому все приборы, служащие для сравнения двух источников, так называемые фотометры, устроены так, что роль глаза сводится к установлению равенства освещенностей двух соприкасающихся полей, освещаемых сравниваемыми источниками. Во всяком фотометре рассматривается некоторое поле, одна часть которого освещена только одним источником, а другая — только другим. Обе сравниваемые части фотометра должны освещаться соответствующими источниками под одним и тем же углом. Глаз наблюдателя должен рассматривать обе части поля также под одинаковыми углами.

Изменяя расстояния источников до фотометра, можно добиться равенства освещенностей обеих частей поля и сравнить между собой силы света двух источников в данном направлении.

При равенстве освещенностей можно записать:

$$E_1 = E_2,$$

$$\frac{I_1 \cos \alpha_1}{r_1^2} = \frac{I_2 \cos \alpha_2}{r_2^2}.$$

Но так как  $\alpha_1 = \alpha_2$ , то  $\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$ ,

$$\text{или } \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (8)$$

Если сила света одного из источников известна (эталонный источник), то по (8) можно определить силу света второго источника в выбранном направлении.

## ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В настоящей работе используется фотометр Люммера-Бродхуна (рис. 3). Существенную часть фотометра составляет кубик Люммера, входящий как составная часть и во многие другие фотометрические аппараты. Кубик Люммера состоит из двух стеклянных призм, сделанных из материала с одинаковым показателем преломления. Призма  $BCA$  — обычная призма полного внутреннего отражения с плоскими гранями. Призма  $OPK$  имеет сферическую грань

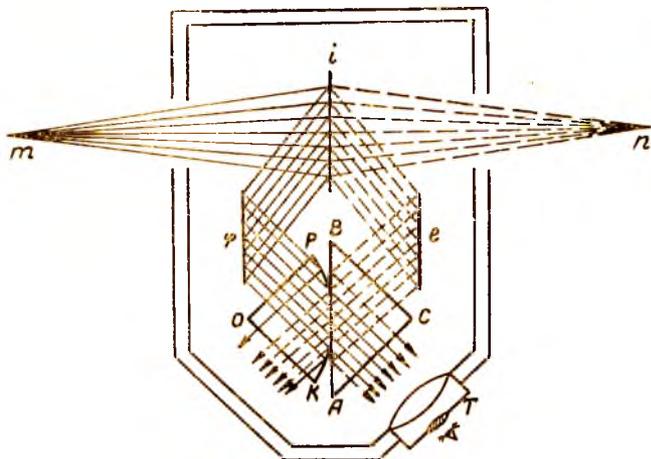


Рис. 3

$PK$ , средняя часть которой срезана на плоскость и шлифована к грани  $AB$  призмы  $ABC$  до оптического контакта, т. е. так, что обе призмы в этом месте ведут себя как сплошное прозрачное тело.

Свет сравниваемых источников  $m$  и  $n$  падает нормально на меловую пластинку  $i$ . Рассеявшись на ней, он попадает на зеркала  $e$  и  $G$ , которые в свою очередь отражают его на грани  $BC$  и  $OP$  кубика. Лучи от зеркала  $G$ , попадающие на место соприкосновения призм, проходят насквозь и попадают в трубу  $T$ .

От зеркала  $e$  в трубу попадают лучи, испытавшие полное внутреннее отражение на той части грани  $BA$ , которая соприкасается с воздушным слоем. Если труба  $T$  сфокусирована на  $AB$ , то наблюдатель, смотрящий в трубу  $T$ , увидит или темное центральное пятно на светлом фоне или, наоборот, светлое пятно на темном фоне, в зависимости от степени освещенности двух сторон пластинки  $i$ . При равной освещенности обеих сторон пластинки поле зрения в трубе кажется освещенным равномерно.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Расположить на крайних ползунках оптической скамьи испытуемую электрическую лампочку и лампу сравнения, между ними поместить фотометр. Затем установить оба источника света на одной высоте с окнами фотометра так, чтобы лучи света падали нормально на пластинку  $i$ . Испытуемую лампу повернуть так, чтобы указатель направления стоял на  $0^\circ$ . Передвигая фотометр в ту или иную сторону, добиться одинаковой освещенности обеих частей поля зрения. По делениям шкалы оптической скамьи определить расстояния источников света от фотометра.

Зная силу света лампы сравнения, определить силу света испытуемой лампы в выбранном направлении по формуле (8).

Поворачивая испытуемую лампу на  $30^\circ$  вокруг вертикальной оси, определить тем же способом силу света в новом направлении. Продолжить измерения силы света лампочки в разных направлениях, поворачивая ее всякий раз на  $30^\circ$  до завершения полного оборота.

Результаты измерений занести в следующую таблицу.

Угол поворота лампы $\alpha$	Расстояние от испытуемой лампы $r_1$	Расстояние от лампы сравнения $r_2$	$I_1 = I_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}$

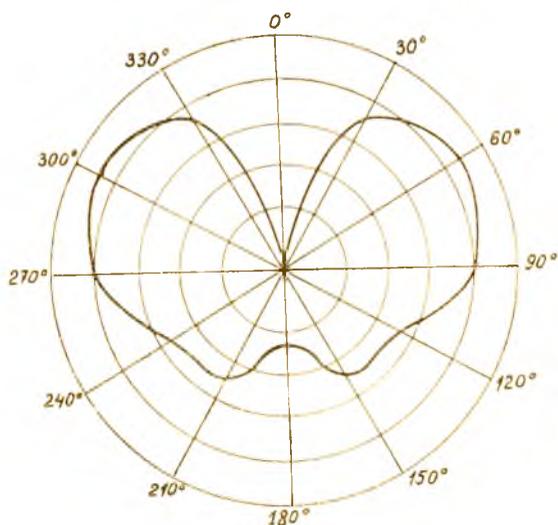


Рис. 4

По полученным результатам вычертить кривую распределения силы света испытуемой лампочки в полярных координатах, откладывая по радиусам силу света. При вычерчивании кривой силу света лампы сравнения можно принять за единицу, т. е. по радиусам откладывать величину  $\frac{r_1^2}{r_2^2}$ .

Образец графика приведен на рис. 4.

### Контрольные вопросы

1. По обе стороны фотометра, установленного на оптической скамье, расположены два источника света — в 5 свечей и 25 свечей. Расстояние между источниками света равно 70 см. Как далеко от источника в 5 свечей стоит фотометр, если обе половины его поля зрения освещены одинаково?

2. Начертите ход лучей в фотометре Льюмера-Бродхуна.

3. Какие еще фотометры вам известны?

4. На столе лежит книга на расстоянии 1 м от основания перпендикуляра, опущенного из лампы на плоскость стола. Лампа может перемещаться вверх и вниз. На какой высоте  $h$  над столом следует ее повесить, чтобы освещенность книги была наибольшей?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг. Оптика. М., Гостехиздат, 1957, § 7—10.

2. А. Г. Чертов. Международная система единиц измерений; М., изд. «Высшая школа», 1967, § 13.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ЯРКОСТИ СВЕТОРАССЕИВАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Принадлежности:** универсальный фотометр ФМ-56, исследуемые образцы.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Окраска различных предметов, освещенных одним и тем же источником света (например, солнцем), бывает весьма разнообразной. Основную роль при этом играет способность предметов к отражению и пропусканию света. Световой поток, падающий на тело, частично отражается (рассеивается), частично пропускается и частично поглощается им.

Отношение потока излучения  $\Phi_r$ , отраженного данным телом, к потоку излучения  $\Phi$ , упавшего на него, называется коэффициентом отражения  $\rho$ , т. е.

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi}.$$

Отношение потока излучения  $\Phi_t$ , пропущенного данным телом, к потоку излучения  $\Phi$ , упавшего на него, называется коэффициентом пропускания, т. е.

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi}.$$

Способность тел отражать, пропускать и поглощать свет различна в зависимости от спектрального состава падающего на них света, от природы вещества и состояния их поверхностей. Этим и определяется различие окраски тел. Например, тело, у которого для красных лучей  $\tau$  (пропускание) велико, а  $\rho$  (отражение) мало, для

зеленых же лучей, наоборот, мало, а  $\rho$  значительно, будет казаться красным в проходящем свете и зеленым в отраженном. У черных непрозрачных тел для всех длин волн поглощение велико, а  $\rho$  и  $\tau$  очень малы (сажа). Тела, у которых коэффициент отражения  $\rho=1$  для всех длин волн, называются идеально белыми. Поверхности тел, у которых величина  $\rho$  не ниже 0,85 для всех длин волн, обычно называются белыми.

Различают два вида отражения — зеркальное и диффузное. Свет, падающий на идеально гладкую поверхность, испытывает правильное (зеркальное) отражение в соответствии с законами отражения:

отраженный луч находится в плоскости падения (плоскость, проходящая через падающий луч и нормаль к границе раздела сред);

угол отражения равен углу падения.

Если же поверхность шероховатая, то свет испытывает диффузное отражение — рассеивание.

В основу теоретического рассмотрения диффузного отражения положено представление о «совершенно шероховатой» поверхности, которая рассеивает равномерно во все стороны падающий на нее свет. Однако многочисленными исследованиями было установлено, что даже наилучшие матовые поверхности (молочные стекла, осадок окиси магния и другие) не являются «совершенно шероховатыми».

Рассмотрим действие краски, нанесенной на тело, при освещении белым светом. Если слой краски достаточно толст, то цвет тела определяется ею и не зависит от свойств слоев, лежащих под краской. Слой краски можно представить схематично в виде мелких зернышек, избирательно рассеивающих свет и погруженных в прозрачную связывающую их массу, например, в масло (рис. 1).

Самый верхний слой отражает практически одинаково все лучи, т. е. от него идет белый свет (его доля — обычно несколько процентов падающего потока), остальная часть потока проникает в глубь слоя краски, где рассеивается ее зернами и частично поглощается. Вследствие избирательности поглощения слой в отраженном свете кажется окрашенным.

Наиболее высоким коэффициентом отражения обладают металлы. Если, например, у стекла при нормальном падении коэффициент отражения от поверхности составляет около 4%, то у металлов он достигает 80—90% (от хорошо полированных поверхностей).

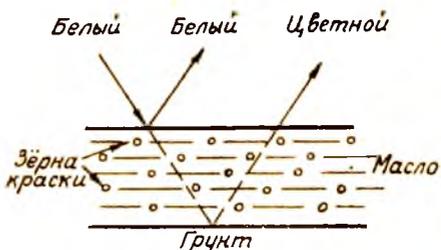


Рис. 1

Жидкий раствор краски так же, как и металлы, обладает высокой отражательной способностью.

Для решения многих задач, связанных с излучением от светящейся поверхности, необходимо знать, как распределяется световой поток по разным направлениям. С этой целью вводится понятие о яркости светящейся поверхности в данном направлении. Яркость  $B_{\varphi}$  измеряется отношением силы света  $I$  в выбранном направлении к проекции светящейся поверхности  $S$  на плоскость, перпендикулярную к этому направлению, т. е.

$$B_{\varphi} = \frac{I}{S \cos \varphi}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угол между перпендикуляром к светящейся поверхности и направлением света.

В общем случае  $B_{\varphi}$  есть величина, зависящая от направления, однако для некоторых светящихся поверхностей эта зависимость не имеет места. Положим, что поверхность излучает свет неодинаково по разным направлениям так, что его сила определяется для каждого данного направления законом Ламберта:

$$I_{\varphi} = I_0 \cos \varphi.$$

В этом случае, согласно (1), яркость одинакова во всех направлениях, т. е.

$$B_{\varphi} = \frac{I_0}{S} = B_0.$$

Для характеристики яркости отражающей поверхности вводят коэффициент яркости  $\beta$  — отношение яркости поверхности  $B_{\varphi}$ , отражающей или пропускающей свет в данном направлении, к яркости одинаково с ней освещенной идеально матовой поверхности  $B_{\text{ид}}$ , имеющей коэффициент отражения, равный единице, т. е.

$$\beta = \frac{B_{\varphi}}{B_{\text{ид}}}.$$

## ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В данной работе измерения выполняются с помощью универсального фотометра ФМ-56, который предназначен для измерения коэффициентов пропускания твердых и жидких прозрачных сред, коэффициентов яркости светорассеивающих образцов и их блеска, а также для спектрофотометрических работ.

Фотометр состоит из следующих основных узлов (рис. 2): фотометрической головки 1, в которой находятся оптические детали (объективы, призмы и т. п.); револьверного диска 2 с одиннадцатью светофильтрами, номера которых появляются в окошке диска; штатива 3; предметного столика 4, который может перемещаться при помощи кремальеры; специального столика 5 с держателем для исследуемых образцов и ответвителя 6 с двумя конденсатора-

ми. Все эти детали смонтированы на массивном круглом основании 10.

В основу устройства прибора положен принцип уравнивания двух световых потоков путем изменения одного из них с помощью диафрагмы с переменным отверстием.

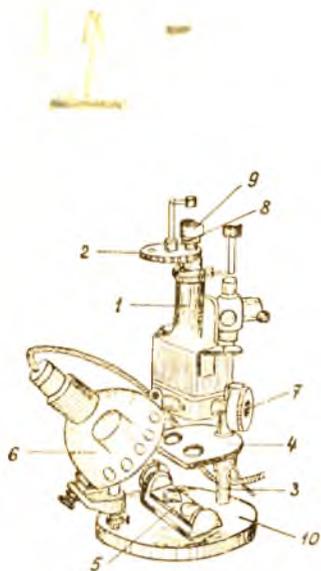


Рис. 2

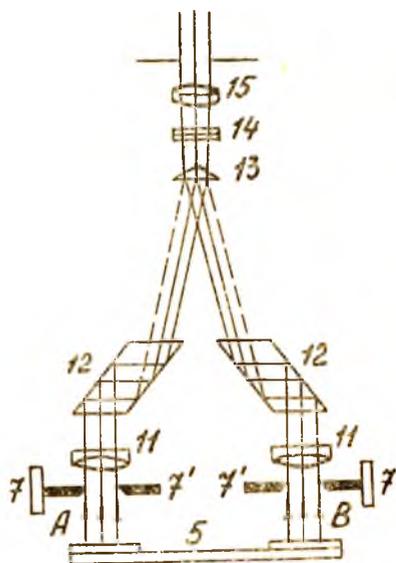


Рис. 3

Два параллельных световых пучка *A* и *B* (рис. 3), выходящие из осветителя, отразившись от образцов, установленных на специальном столике 5, попадают в прибор через две диафрагмы 7', степень раскрытия которых регулируется поворотом барабанов 7. Далее световые пучки *A* и *B* проходят через объективы 11 и ромбические призмы 12. Пройдя последние, световые пучки идут под углом друг к другу и попадают на бипризму 13, которая сводит два пучка к оси окуляра 15, причем часть правого пучка, попадая на левую половину бипризмы, создает яркость левой половины поля зрения, а другая часть его, попадающая на правую половину бипризмы, отклоняется в сторону и поглощается внутри прибора.

Левый пучок проходит симметрично правому. После бипризмы лучи проходят через один из одиннадцати светофильтров 14, помещенных в револьверном диске 2 (рис. 2), и попадают в окуляр 15, а из окуляра через наглазник 9 (рис. 2) — в глаз наблюдателя. Окуляр, служащий для наблюдения поля зрения, имеет кольцо 8, с помощью которого производится установка на резкость линии раздела поля зрения.

Наблюдатель видит поле зрения разделенным прямой линией на две половины, имеющие, в общем случае, различную яркость.

Яркость правой части определяется световым потоком, проходящим через левую диафрагму, а левой — через правую. Когда обе диафрагмы 7' одинаково освещены и в одинаковой мере раскрыты, то яркость обеих половин поля зрения будет одинакова. Если при равенстве яркостей обеих половин поля зрения на пути одного светового потока, например  $A$ , поместить пластинку из какого-либо вещества, поглощающего или отражающего свет, то фотометрическое равновесие нарушится. В этом случае можно уравнять поля уменьшением отверстия диафрагмы, через которую проходит световой поток  $B$ .

На измерительных барабанах 7 нанесены две шкалы — черная и красная. На черной шкале нанесены отношения (в %) площади  $S$  отверстия диафрагмы при данном ее раскрытии к площади  $S_0$  при максимальном ее раскрытии. Другая шкала — красная — соответствует оптической плотности образца, под которой понимают отрицательный десятичный логарифм коэффициента пропускания.

В данной работе предлагается определить коэффициенты яркости и отражения образцов и найти зависимость коэффициента отражения исследуемого образца от длины волны.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Включить через трансформатор 220/8 в лампу осветителя. Пользуясь реостатом, рукоятка которого находится на крышке трансформатора, можно регулировать величину накала лампы, а пользуясь выключателем на той же крышке, можно включать и выключать прибор без отключения трансформатора от сети.

### У п р а ж н е н и е 1

#### Определение коэффициентов яркости образцов

1. Поставить поворотный столик 5 в горизонтальное положение (отсчет 0 по лимбу столика).

2. Положить на оба держателя эталонные пластинки и установить осветитель так, чтобы обе пластинки были равномерно освещены.

3. Ввести светофильтр № 10.

4. Произвести фокусировку окуляра с помощью кольца 8 так, чтобы линия раздела поля была четко видна.

5. Установить левый барабан на деление 100 по черной шкале и произвести уравнивание полей фотометра, вращая правый барабан.

6. Заменить эталонную пластинку в правом держателе исследуемым образцом. При этом левая половина поля потемнеет. Вращая левый измерительный барабан, добиться равенства яркостей обеих половин поля зрения и сделать отсчет  $r$  по черной шкале левого барабана. Такое уравнивание произвести три раза и вычислить среднее значение  $r_{\text{ср}}$ .

7. Определить коэффициент яркости образца  $\beta_{\text{обр}}$  по следующей формуле:

$$\beta_{\text{обр}} = \frac{r}{100\%} \beta_{\text{пл.}}, \quad (2)$$

где  $\beta_{\text{пл.}}$  — коэффициент яркости эталонной пластинки ( $\beta_{\text{пл.}}$  см. на пластинке).

Определить коэффициенты яркости для двух образцов и результаты занести в таблицу 1.

Примечание: Справедливость формулы (2) можно доказать следующим образом. В соответствии с формулой (1), освещенность, создаваемая эталонной пластинкой, равна:

$$E_{\text{пл}} = B_{\text{пл}} \frac{S_{\text{пл}} \cos i_1}{R_1^2}.$$

Здесь  $B_{\text{пл}}$  — яркость эталонной пластинки;  $S_{\text{пл}}$  — площадь светящейся поверхности;  $R_1$  — расстояние между пластинкой и ее изображением в фокальной плоскости окуляра;  $i_1$  — угол, который составляют лучи, отраженные от эталонной пластинки, с нормалью к ее поверхности.

Освещенность, создаваемая исследуемым образцом, равна:

$$E_{\text{обр}} = B_{\text{обр}} \frac{S_{\text{обр}} \cos i_2}{R_2^2},$$

где  $B_{\text{обр}}$  — яркость образца,  $S_{\text{обр}}$  — площадь его светящейся поверхности,  $R_2$  — расстояние между образцом и его изображением в фокальной плоскости окуляра,  $i_2$  — угол между лучами, отраженными от образца, и нормалью к его поверхности.

При фотометрическом равновесии  $E_{\text{обр}} = E_{\text{пл.}}$ . Фотометр устроен так, что  $R_1 = R_2$ , а  $i_1 = i_2 = 0^\circ$ . Поэтому

$$B_{\text{пл.}} \cdot S_{\text{пл.}} = B_{\text{обр.}} \cdot S_{\text{обр.}}$$

$$B_{\text{обр.}} = B_{\text{пл.}} \frac{S_{\text{пл.}}}{S_{\text{обр.}}}$$

Площади светящихся поверхностей эталонной пластинки и исследуемого образца равны соответственно площадям раскрытия диафрагм, расположенных над ними, т. е.

$S_{\text{пл.}} = S$ ,  $S_{\text{обр.}} = S_0$ , а  $B_{\text{обр.}} = B_{\text{пл.}} \frac{S}{S_0}$ , но  $\frac{S}{S_0}$  есть отсчет  $r$  по черной шкале левого измерительного барабана.

По определению коэффициента яркости:

$$\beta_{\text{обр.}} = \frac{B_{\text{обр.}}}{B_{\text{ид.}}}, \quad \beta_{\text{пл.}} = \frac{B_{\text{пл.}}}{B_{\text{ид.}}}$$

Следовательно,  $\beta_{\text{обр.}} = r \cdot \beta_{\text{пл.}}$  или в процентах

$$\beta_{\text{обр.}} = \beta_{\text{пл.}} \frac{r}{100\%}.$$

№ п. п.	$r_1$ в %	$\beta_1$ в %	$r_2$ в %	$\beta_2$ в %
1				
2				
3				
Среднее				

## Упражнение 2

### Изучение зависимости коэффициента отражения от длины волны

В том случае, когда исследуемый образец и эталонная пластинка имеют одинаковые светорассеивающие свойства, коэффициент отражения образца можно определить по формуле

$$\rho_{\text{обр}} = \rho_{\text{пл}} \frac{r}{100\%}. \quad (3)$$

Действительно, если поверхность светит за счет рассеяния падающего на нее излучения, то ее яркость определяется ее же освещенностью (см. С. Э. Фриш и А. В. Тимофеев. Курс общей физики, т. 3, Физматгиз, 1962., § 304):

$$B_{\text{пл}} = \frac{\rho_{\text{пл}}}{\pi} \cdot E_{\text{пл}},$$

$$B_{\text{обр}} = \frac{\rho_{\text{обр}}}{\pi} \cdot E_{\text{обр}}.$$

Здесь  $\rho_{\text{пл}}$  и  $\rho_{\text{обр}}$  — коэффициенты отражения эталонной и исследуемой пластинок. При условии фотометрического равновесия  $E_{\text{пл}} = E_{\text{обр}}$ ,

тогда  $\frac{B_{\text{обр}}}{B_{\text{пл}}} = \frac{\rho_{\text{обр}}}{\rho_{\text{пл}}}$ , но  $\frac{B_{\text{обр}}}{B_{\text{пл}}} = r$  (см. упражнение 1), поэтому  $\rho_{\text{обр}} = r \cdot \rho_{\text{пл}}$  или в процентах

$$\rho_{\text{обр}} = \rho_{\text{пл}} \frac{r}{100\%} \quad (\rho_{\text{пл}} \text{ см. на пластинке}).$$

Таким образом, измерение коэффициента отражения на этом приборе сводится к измерению коэффициента яркости. Упражнение выполняется в следующем порядке: поворачивая револьверный диск 2, включать поочередно светофильтры № 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; для каждого светофильтра произвести уравнивание полей зрения фотометра по яркости и каждый раз записывать показания левого

барабана в таблицу 2. Вычислить коэффициенты отражения данного образца при различных светофильтрах.

Таблица 2

№ фильтра	Маркировка фильтра	$\lambda$ эфф, м.мк	$r$ , %	$\rho_{\text{обр}}$ , %
5	M-58	533		
6	M-53	496		
7	M-47	465		
8	M-43	432		
9	K-2	633		
10	K-4	550		
11	K-6	478		

Построить график зависимости коэффициента отражения образца  $\rho_{\text{обр}}$  от длины волны  $\lambda$ , т. е.  $\rho_{\text{обр}} = f(\lambda)$ , откладывая по оси абсцисс длину волны, а по оси ординат — коэффициенты отражения.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите явления, сопровождающие прохождение света через вещество.
2. Как зависят коэффициенты отражения, пропускания и поглощения вещества от длины волны света?
3. Начертите оптическую схему фотометра ФМ-56.
4. Пользуясь полученным в работе графиком, определите  $\rho_{\text{обр}}$  для  $\lambda_1=450$  м.мк и  $\lambda_2=575$  м.мк.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш и А. В. Тимофеева. Курс общей физики, т. 3, Физматгиз, 1962, § 304.
2. Г. А. Зисман и О. М. Тодес. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1965, § 4, 5.
3. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Гостехиздат, 1952, § 7.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРА В РАСТВОРЕ

**Принадлежности:** оптическая скамья, источник света, два поляроида, фотоэлемент, гальванометр, сосуд с сахарным раствором, светофильтры.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

С точки зрения электромагнитной теории, свет представляет собой поперечные электромагнитные волны. На рис. 1 прямая  $OC$  показывает направление распространения электромагнитной волны.

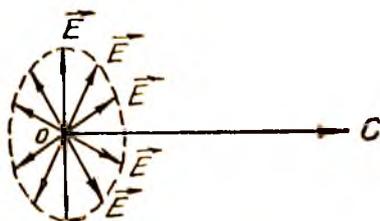


Рис. 1

Обычно векторы электрического поля  $\vec{E}$  и магнитного поля  $\vec{H}$  светового луча хаотически меняют свою ориентацию, все время оставаясь перпендикулярными друг к другу и к лучу. Такой свет принято называть естественным (вектор  $\vec{H}$  на рис. 1 не изображен).

Линейно поляризованным называется свет, в котором колебания электрического вектора  $\vec{E}$  совершаются в одной фиксированной плоскости, проходящей через луч (рис. 2).

Плоскость  $P$ , проходящая через направление распространения и направление колебаний вектора  $\vec{E}$ , называется плоскостью колебаний, а плоскость  $Q$ , в которой колеблется вектор  $\vec{H}$  — плоскостью

поляризации. Плоскость колебаний перпендикулярна плоскости поляризации.

Естественный свет можно поляризовать различными способами. Для этого используется явление поляризации света при отражении и преломлении, а также при двойном лучепреломлении. Свойством двойного лучепреломления обладают, например, кристаллы исландского шпата ( $\text{CaCO}_3$ ). Кристалл исландского шпата легко выкалывается в виде ромбоэдра, причем грани его имеют углы  $101^\circ 52'$  и  $78^\circ 8'$ .

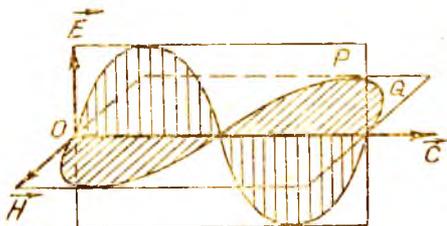


Рис. 2

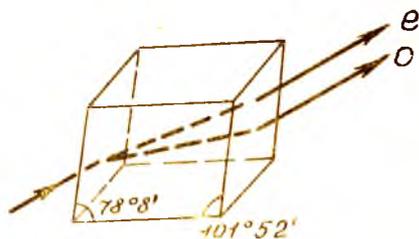


Рис. 3

Узкий пучок света, проходя через такой кристалл, разделяется на два пучка (рис. 3). Это явление наблюдается даже при перпендикулярном падении луча на естественную грань кристалла.

Лучи, образовавшиеся при двойном лучепреломлении, в случае падения естественного луча, обладают следующими свойствами.

1. Один из лучей подчиняется обычным законам преломления, его показатель преломления не зависит от угла падения. Скорость распространения этого луча внутри кристалла во всех направлениях одинакова. Такой луч называется обыкновенным (луч  $O$  на рис. 3).

2. Другой луч не подчиняется обычным законам преломления, его показатель преломления зависит от направления распространения луча внутри кристалла. Следовательно, скорость распространения этого луча различна в разных направлениях. Этот луч называется необыкновенным (луч  $e$  на рис. 3).

3. В кристалле существует такое направление, вдоль которого скорость распространения обыкновенного и необыкновенного лучей одинакова. Прямая, проведенная через любую точку кристалла в этом направлении, называется его оптической осью. Плоскость, содержащая оптическую ось и данный луч, называется главным сечением кристалла по отношению к данному лучу.

4. Яркость обыкновенного и необыкновенного лучей одинакова.

5. Оба луча, обыкновенный и необыкновенный, полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обыкновенный луч поляризован в плоскости соответствующего ему главного сечения, а необыкновенный — перпендикулярно к плоскости соответствующего ему главного сечения.

Для получения линейно поляризованного света достаточно исключить один из лучей, образовавшихся при двойном лучепреломлении.

Некоторые вещества обладают свойством неодинаково поглощать лучи, поляризованные в разных плоскостях. Это явление, называемое дихроизмом, используется для получения поляризованного света при помощи так называемых поляроидов.

Поляроид представляет собой тонкую поляризующую свет пленку, заклеенную для защиты от механических повреждений и действия влаги пластинками из стекла или пленками из ацетиленцеллюлозы. Существует несколько видов поляроидов:

1. Геранатитовые поляроиды представляют собой пленку целлулоза или другого прозрачного материала, на которую нанесены тонким слоем определенным образом ориентированные микроскопические кристаллики сернокислого йод-хинина, называемого геранатитом. Кристаллы геранатита почти полностью поглощают обыкновенный луч. Таким образом, падающий естественный свет, проходя сквозь поляроид, становится линейно поляризованным.

2. Йодо-поливиниловые поляроиды — сильно растянутые в одном направлении пленки поливинилового спирта, окрашенные раствором йода в йодистом калии. Ориентированные растяжением молекулярные цепи поливинилового спирта с присоединенными к ним атомами образуют структуру, почти полностью поляризующую проходящий свет.

3. Наибольшее применение сейчас нашли поливинилитеновые поляроиды. Отщепляя воду от ориентированных молекул в растянутых пленках поливинилового спирта, можно превратить их в молекулы поливинилена, обладающего собственным резко выраженным дихроизмом.

Если на пути луча, вышедшего из первого поляроида (поляризатора), поставить второй поляроид (анализатор), то интенсивность света, прошедшего через анализатор, определится законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность света, падающего на анализатор;  $\alpha$  — угол между главными сечениями анализатора и поляризатора. Потери на отражение, зависящие от  $\alpha$ , законом Малюса не учитываются.

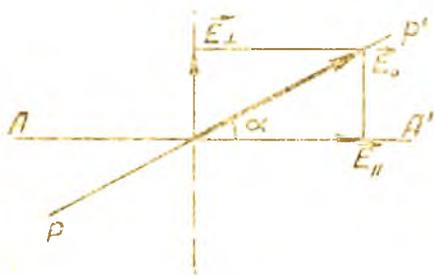


Рис. 4

Разберем этот вопрос несколько подробнее. Обозначим амплитуду электрического вектора луча, прошедшего через поляризатор, буквой  $E_0$ . Пусть плоскость главного сечения анализатора  $AA'$  повернута относительно плоскости главного сечения поляризатора  $PP'$  на угол  $\alpha$  (рис. 4).

Разложим вектор  $E_0$  на две составляющие: параллельную плоскости анализатора ( $E_{11}$ ) и перпендикулярную к ней ( $E_{\perp}$ ). Одна из них  $E_{11}$  пройдет через анализатор, а другая  $E_{\perp}$  погасится. Из рис. 4 видно, что

$$E_{11} = E_0 \cos \alpha.$$

Отношение интенсивностей пропорционально отношению квадратов амплитуд:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{E_0^2}{E_{11}^2} = \frac{1}{\cos^2 \alpha}, \text{ следовательно, } I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

При прохождении линейно поляризованного света через некоторые вещества плоскость поляризации световых лучей поворачивается. Это явление называется вращением плоскости поляризации. Вещества, вращающие плоскость поляризации, называются оптически активными. К ним относятся кварц, винная кислота, раствор сахара в воде и другие. Свет, прошедший через оптически активное вещество, остается линейно поляризованным. Некоторые оптически активные вещества поворачивают плоскость поляризации вправо, т. е. по часовой стрелке, если смотреть навстречу лучу (правовращающие вещества), другие — влево (левовращающие вещества).

В растворах оптически активных веществ вращение плоскости поляризации пропорционально длине  $L$  пути луча в растворе и концентрации раствора  $C$

$$\alpha = \alpha_0 CL, \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  — удельное вращение (угол поворота плоскости поляризации при длине пути луча в 1 м и объемно-весовой концентрации данного оптически активного вещества, равной 1 кг/м<sup>3</sup>) зависит от длины волны света, а также от рода растворителя и температуры раствора.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 1

#### Изучение закона Малюса

В данной работе в качестве поляризатора и анализатора применяются поляроиды. Поляроиды имеют некоторые существенные недостатки: не обеспечивают полной поляризации света, особенно в области коротких волн, и не одинаково прозрачны для лучей разных длин волн. Поэтому при использовании поляроидов закон Малюса (1) записывают в таком виде:

$$I = I_1 + I_0 \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Здесь  $I_1$  — интенсивность прошедшего через поляризатор неполяризованного луча, не зависящая от угла  $\alpha$  между главными сечениями анализатора и поляризатора,  $I_0 \cos^2 \alpha$  — интенсивность линейно поляризованного света, прошедшего через анализатор.

В предлагаемом упражнении изучается зависимость величины  $I$  от угла  $\alpha$  с помощью фотоэлемента с запирающим слоем. При этом

зависимость величины фототока от интенсивности света, падающего на фотоэлемент, считается линейной. Схема установки приведена на рис. 5.

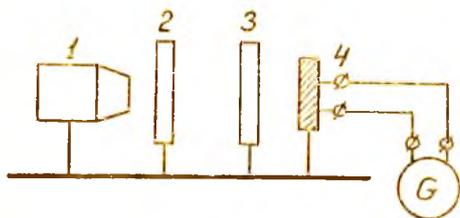


Рис. 5

При выполнении этого упражнения нужно придерживаться следующего порядка.

1. Установить приборы на оптической скамье так, чтобы центры источника света 1, поляризатора 2, анализатора 3 и фотоэлемента 4 были на одной прямой. Метку на оправе анализатора совместить с нулем шкалы.

2. Включить лампу 1 и, вращая поляризатор, установить его так, чтобы интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора, была максимальной. Фотоэлемент расположить на таком расстоянии от анализатора, чтобы стрелка гальванометра не выходила за пределы шкалы.

3. Вращая анализатор на  $360^\circ$ , отмечать через каждые  $10^\circ$  величину фототока  $i$ . Опыт повторить два раза. Все наблюдения и расчеты записать в таблицу

$\alpha$	$\cos \alpha$	$\cos^2 \alpha$	$i_1$	$i_2$	$i_{\text{ср}}$

4. Построить график зависимости фототока  $i_{\text{ср}}$  от величины  $\cos^2 \alpha$ .

Примечание: Величина фототока  $i$  пропорциональна интенсивности света  $I$ , падающего на фотоэлемент. Поэтому для проверки формулы (3) можно откладывать по оси ординат вместо интенсивности света  $I$  величину фототока  $i$ .

## Упражнение II

### Определение концентрации сахара в растворе

1. Установить приборы на оптической скамье согласно рис. 6.

Между источником света *1* и поляризатором *2* вставить светофильтр *5*. Метку на оправе анализатора *3* совместить с делением шкалы  $90^\circ$ . Вращением поляризатора установить минимум интенсивности света. Наблюдение произвести визуально из точки *М*.

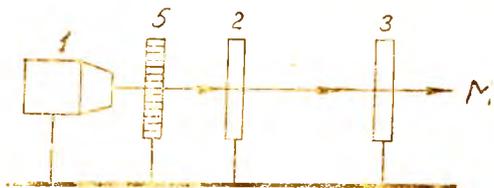


Рис. 6

2. Поместить сосуд с раствором сахара между анализатором и поляризатором. Поле зрения при этом прояснится.

3. Восстановить минимальную интенсивность света, для чего анализатор повернуть по часовой стрелке (т. к. раствор сахара поворачивает плоскость поляризации вправо). Угол поворота  $\alpha$  определить по шкале на оправе анализатора. Отсчеты угла  $\alpha$  произвести несколько раз и найти среднее значение. По формуле (2) рассчитать концентрацию сахара в растворе. Значения  $\alpha_0$  даны ниже. Все результаты наблюдения и расчетов занести в таблицу.

№ п.п.	Фильтр	$\frac{\alpha_0}{\lambda}$ , град. м <sup>2</sup> /кэ	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_{\text{ср}}$	$\frac{C}{\frac{\text{кэ}}{\text{м}^3}}$
1	Зеленый $\lambda = 5351 \text{ \AA}$	0,818					
2	Желтый $\lambda = 5893 \text{ \AA}$	0,665					

Длина пути луча в растворе  $L$  указана на трубке с раствором.

### Контрольные вопросы

1. Какой свет называется линейно поляризованным?
2. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
3. Какими свойствами обладает обыкновенный и необыкновенный лучи?
4. Что из себя представляют поляроиды? Какие виды поляроидов применяются на практике?
5. Вывести закон Малюса.
6. Какие вещества называются оптически активными?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг. Оптика, Гостехиздат, 1957, § 91—98, 155—159.
2. Н. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1967, § 28—30, 31.

**ИЗУЧЕНИЕ ЧИСТОТЫ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА**

**Принадлежности:** микроинтерферометр МИИ-4, исследуемый образец, фотография МИИ-4.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

В лабораториях научно-исследовательских и учебных институтов, в заводских лабораториях, занимающихся вопросами чистоты обработки поверхности изделий, применяются интерферометры различных конструкций. Принцип действия интерферометров основан на использовании явления интерференции света для визуальной оценки и измерения высоты неровностей тонкообработанных поверхностей, а также фотографирования обнаруженных дефектов обработки.

В предлагаемой работе применяется микроскоп-интерферометр МИИ-4, принцип действия которого разработан академиком В. П. Линником.

Как известно, для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением пучка лучей от одного источника на два пучка. В интерферометре МИИ-4 системой, разделяющей световой пучок, является наклонная плоскопараллельная пластина, имеющая полупрозрачное покрытие. Половину падающего на нее света пластина отражает, а половину пропускает, вследствие чего образуются два когерентных пучка света. При вынужденном окуляре, действительно, наблюдаются два изображения источника света. В результате интерференции этих пучков света в фокальной плоскости окуляра различаются интерференционные полосы. В точках поля наблюдения, где оптическая разность хода

пучков равна  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  и т. д., получаются светлые полосы, а в точках, где разность хода равна  $\frac{\lambda}{2}$ ,  $3\frac{\lambda}{2}$ ,  $5\frac{\lambda}{2}$  и т. д., — темные полосы.

Интерференционная картина в белом свете имеет следующий вид: в центре поля — белая ахроматическая полоса, по обеим сторонам от нее — две черные полосы с цветными каемками и дальше — по три или четыре цветные полосы с каждой стороны. Переход от одной светлой (или темной) полосы к другой светлой (или темной) полосе соответствует изменению разности хода лучей на одну длину волны  $\lambda$ .

В приборе имеются два светофильтра (зеленый и желтый), с помощью которых получается монохроматический свет. При работе в монохроматических лучах в поле зрения должны быть видны чередующиеся черные и светлые (зеленые или желтые) полосы.

Оптическая схема описываемого интерферометра изображена на рис. 1.

Пучок света от источника  $S$  падает на полупрозрачную стеклянную пластинку  $P$  и разделяется ею на два пучка, один из которых сразу попадает на исследуемую поверхность  $\Pi$ , а второй — на гладкое эталонное зеркало  $Z_1$ . После отражения эти лучи вновь соединяются на пластинке  $P$  и выходят из интерферометра вертикально вниз.

Интерференционная картина рассматривается в поле зрения окуляра  $Ok$ . Для удобства наблюдения направление интерферирующих лучей изменяется зеркалом  $Z_2$ . Луч  $1$  проходит пластинку  $P$  дважды (вверх и вниз). Для того, чтобы устранить возникающую при этом дополнительную разность хода, на пути горизонтального луча  $2$  устанавливается стеклянная пластинка  $K$  параллельно  $P$  и такой же толщины. Следует учесть, что на рис. 1 показан только ход центральных лучей от источника. Разность хода интерферирующих лучей обусловлена разностью плечей интерферометра и наклоном поверхностей  $\Pi$  и  $Z_1$ .

В поле зрения окуляра видны одновременно интерференционные полосы и исследуемая поверхность  $\Pi$ . Перемещение исследуемой поверхности вверх или вниз на какую-либо малую величину вызывает изменение хода лучей (разности хода) на удвоенную величину, так как свет проходит расстояние до  $\Pi$  дважды.

Например, при смещении поверхности  $\Pi$  на величину, соответствующую расстоянию  $\frac{\lambda}{2}$ , полосы в поле зрения сместятся на один

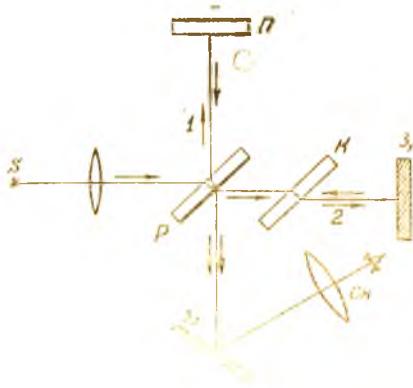


Рис. 1

интервал между ними, что соответствует изменению разности хода на  $\lambda$ .

Аналогичная картина будет и в том случае, когда сама поверхность  $\Pi$  остается на месте, но на ней есть дефекты обработки — бугры или впадины. Если, например, на ней имеется борозда глубиной  $\frac{\lambda}{2}$ , то возникнет добавочная разность хода, равная  $\lambda$ , и интерференционная полоса искривится так, что достигнет полосы следующего порядка (рис. 2).



Рис. 2.

Аналогично искривятся все интерференционные полосы, перпендикулярные борозде.

При оценке искривления полосы величину искривления  $b$  выражают в долях интервала  $a$  между полосами.

Другими словами, величину искривления  $n$  находят как отношение глубины искривления полос  $b$  к расстоянию между ними  $a$ :  $n = \frac{b}{a}$ ;

искомая глубина борозды  $d$  определится из соотношений:

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad d = \frac{b}{a} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

Выражение (1) справедливо и для дробных значений  $n$ .

Все измерения, производимые на интерферометре МИИ-4, очень точны. Точность измерения величины искривления составляет 0,1 интервала между полосами, что соответствует высоте неровности, равной

$$\frac{\lambda}{2} \cdot 0,1 = 0,05 \lambda.$$

Например, при  $\lambda = 0,53$  мкм наименьшая высота неровности, которую можно измерить на приборе, составляет:

$$0,05 \times 0,53 \text{ мкм} = 0,0265 \text{ мкм}.$$

Итак, приблизительно 0,027 мкм соответствует 0,1 интервала между полосами.

В данной работе предлагается изучить с помощью микроинтерферометра МИИ-4 поверхность тонкообработанного образца в белом и монохроматическом свете, отыскать дефектные участки поверхности и измерить высоту или глубину неровностей.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством прибора МИИ-4, используя прилагаемую фотографию.

2. Положить на предметный столик интерферометра образец исследуемой поверхностью вниз и включить осветитель. Повернуть рукоятку 2 так, чтобы указатель стоял вертикально, и вращением микрометрического винта добиться резкого изображения исследуемой поверхности.

3. Включить головку объектива, повернув рукоятку 2 так, чтобы указатель стоял горизонтально. В этом случае при наблюдении в окуляр будут одновременно видны исследуемая поверхность и интерференционные полосы. Резкость изображения их можно изменять вращением винта 3.

4. Вращая столик, установить образец так, чтобы следы обработки поверхности (борозды) оказались перпендикулярными интерференционным полосам.

5. Установить окулярный микрометр 4 на тубусе микроскопа до упора и развернуть его так, чтобы одна из линий перекрестия была направлена вдоль интерференционных полос.

6. Найти участок неискривленных интерференционных полос и произвести измерение расстояния между соседними полосами — только темными или только светлыми. С этой целью подвести нить перекрестия сначала к одному краю измеряемой полосы и записать отчет  $N_1$ , затем переместить нить к другому краю полосы и записать отчет  $N_2$ .

Очевидно:

$$a = N_1 - N_2. \quad (2)$$

Все измерения следует производить как в белом, так и в монохроматическом свете.

7. Перемещая образец на предметном столике, выбрать и зарисовать участки с искривлениями интерференционных полос. Обратить внимание на изменение расстояний между полосами и изменение ширины полос при исследовании объекта в различных монохроматических лучах.

Произвести измерение глубины искривления

$$b = N_3 - N_4. \quad (3)$$

8. Определить глубину неровности поверхности по формулам

$$d = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} \quad (4)$$

для монохроматического света и

$$d = 0,27 \cdot \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} \quad (5)$$

для белого света.

Высота неровности на поверхности в 0,27 мкм вызывает искривление полосы в поле зрения на целый интервал или одну полосу, что учтено в формуле (5).

При работе со светофильтрами используйте следующие значения длин волн:

$$\lambda_{\text{зелен.}} = 543 \text{ нм}$$
$$\lambda_{\text{желт.}} = 590 \text{ нм}$$

9. Результаты измерений занесите в таблицу:

Цвет поля	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$d$
зеленый					
желтый					
белый					

### Контрольные вопросы

1. Какие способы получения когерентных лучей применяются в оптических системах?
2. Начертить оптическую схему интерферометра МШП-4 и объяснить принцип его действия.
3. Указать известные вам случаи применения явления интерференции света в измерительной технике.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Гостехиздат, глава VII.
2. Р. В. Поль. Оптика и атомная физика, М., изд. «Наука», 1966, глава VI.
3. Физический энциклопедический словарь, т. 2, М., изд. «Советская энциклопедия», 1962, стр. 196—204, т. 3, стр. 230.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЭЛЕЯ

Принадлежности: интерферометр Рэлея, насос, манометр, колба.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Интерферометр Рэлея — это универсальный интерференционный рефрактометр, т. е. прибор, предназначенный для точного определения коэффициентов преломления прозрачных сред (жидкостей, газов) и для изучения зависимости этих коэффициентов от концентрации, давления и других характеристик исследуемой среды.

Для создания интерференционной картины в рефрактометре пучок света пространственно разделяется на два когерентных луча с помощью двух параллельных щелей в непрозрачном экране. Эти лучи проходят разные оптические пути — один идет через эталонную среду, другой — через исследуемую, затем лучи сводятся вместе; в результате их интерференции в поле окуляра зрительной трубы наблюдается дифракционная картина, по которой производится подсчет коэффициентов преломления.

С теоретическим материалом о дифракции света на двух щелях можно познакомиться в одном из учебных пособий, например в [1].

### УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЭЛЕЯ

Оптическая схема интерферометра представлена на рис. 1. Источником света служит освещенная щель малой ширины  $S$ , расположенная в фокальной плоскости объектива  $O_1$ . Выходящий из  $O_1$  параллельный пучок лучей попадает на диафрагму  $D$ , в которой имеются две узкие параллельные щели. После дифракции на этих щелях пучки света  $I$ , проходящие в нижней части щелей,

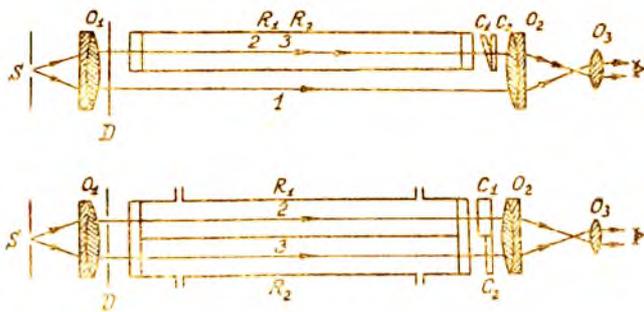


Рис. 1

беспрепятственно попадают в объектив  $O_2$  зрительной трубы и дают в нижней части поля зрения окуляра  $O_3$  систему интерференционных полос, вместо одного изображения щели  $S$  (рис. 2).

На пути лучей 2 и 3, проходящих в верхней части щелей диафрагмы  $D$ , находится кювета, состоящая из двух трубок  $R_1$  и  $R_2$  (см. вид сверху). Трубки имеют одинаковые длины и с торцов закрыты одинаковыми плоскопараллельными стеклянными пластинками. Одна трубка заполняется испытуемым газом (или жидкостью), а другая — эталонным. Вследствие разницы в величине коэф-

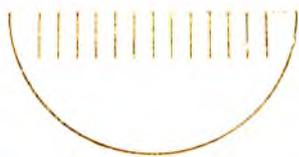


Рис. 2



Рис. 3

фициентов преломления веществ, наполняющих первую и вторую трубки, лучи 2 и 3 приобретают оптическую разность хода, равную, очевидно, длине кюветы, умноженной на разность показателей преломления. За счет появления этой разности хода система интерференционных полос в верхней части фокальной плоскости окуляра  $O_3$  зрительной трубы сдвигается относительно нижней части (рис. 3) в ту или другую сторону.

Измеряя величину этого смещения, можно найти разность показателей преломления ( $n_1 - n_2$ ) эталонного и испытуемого веществ.

ва. В том случае, когда разность хода лучей 2 и 3 равна нулю, верхняя система интерференционных полос совпадает с неподвижной нижней системой полос. Нижняя система полос является индексом, по которому производится отсчет.

Измерение перемещения верхней системы полос производится компенсатором. Он состоит из двух стеклянных плоскопараллельных пластинок  $C_1$  и  $C_2$ , которые устанавливаются на пути лучей 2 и 3 под некоторым углом друг к другу. Угол поворота пластинок отсчитывается по угломерному устройству (микрометрический винт). Меняя угол поворота, можно компенсировать ту разность хода, которая создается в кювете. Численное значение вводимой разности хода определяется по перемещению барабана микрометра. На нем имеется две шкалы — неподвижная с 30 делениями и вращающаяся со 100 дольными делениями.

Цена деления подвижной шкалы соответствует смещению интерференционной картины на 1/30 полосы. Смещение интерференционной картины на одну полосу соответствует изменению разности хода лучей на одну длину волны. Так как освещение производится белым светом, то расчет ведется для средней длины волны видимого спектра ( $\lambda = 550$  мкм).

В данной работе ставится задача исследовать изменение показателя преломления воздуха с изменением давления. Для этого в одной из трубок кюветы поддерживается атмосферное (эталонное) давление, в другой трубке давление увеличивается или уменьшается с помощью насоса. Получающиеся при этом изменения интерференционной картины компенсируются соответствующими поворотами микрометрического механизма.

Измерения начинают с определения нулевого положения шкалы интерферометра, когда все края насосной системы (рис. 4)

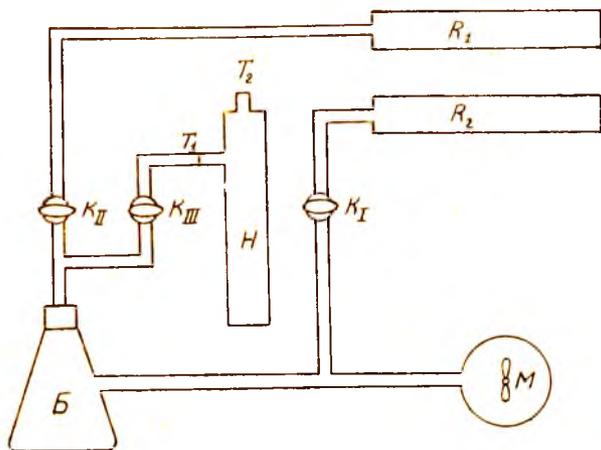


Рис. 4

открыты и резиновый шланг отключен от насоса. Щель  $S$  освещают лампочкой осветителя, добываясь через понижающий трансформатор такой яркости, чтобы интерференционные полосы в окуляре были хорошо видны (не нужно ставить на максимальную яркость).

Лампочка включается только на время отчета по интерферометру. Линзу окуляра устанавливают по своему зрению. С помощью микрометричного винта добиваются в поле окуляра совмещения верхней и нижней системы интерференционных полос. Совмещение контролируют по нулевой полосе, которую можно узнать по отсутствию хроматизма (цветных каемок). Определение нулевого положения производят несколько раз, поворачивая микрометр в ту и другую сторону. В случае расхождения отсчетов берут среднее значение.

Изменение давления воздуха в трубках кюветы осуществляют с помощью насосной системы (рис. 4); правила обращения с этой системой прилагаются к прибору.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. Определение разности хода лучей при повышении давления воздуха в одной из трубок кюветы

В трубке  $R_1$  поддерживается атмосферное давление, а в  $R_2$  постепенно нагнетается воздух, поэтому  $R_1$  должна быть отключена от насоса (кран  $K_{II}$  закрыт). Трубка  $R_2$  соединяется с насосом  $\Pi$  через баллон  $B$  для более плавного изменения давления. Резиновый шланг, идущий от баллона  $B$ , надевается на трубку  $T_1$  насоса, краны  $K_I$  и  $K_{II}$  открываются, производится повышение давления до требуемой величины. Затем кран  $K_I$  закрывается и записываются показания манометра.

Включая осветитель и наблюдая в окуляр, приводят к совмещению верхнюю и нижнюю системы полос, производят отчет по микрометру. Вычитая из этого значения нулевое показание прибора, находят разность хода лучей, выраженную в делениях микрометра.

### 2. Определение разности хода лучей при понижении давления воздуха в одной из трубок кюветы

Прежде чем производить измерения, снова проверяют положение нулевой точки прибора. Конструкция прибора не дает возможности получить компенсацию разности хода, если по-прежнему в трубке  $R_1$  поддерживать атмосферное давление, а из трубки  $R_2$  вести откачку воздуха. Поэтому поступают так: в трубке  $R_2$  устанавливают атмосферное давление, а из трубки  $R_1$  производят откачку. Шланг баллона  $B$  соединяют с насосом через трубку  $T_2$ . Все остальные операции производятся аналогично описанным выше.

### 3. Вычисление разности показателей преломления при заданном и атмосферном давлениях

Так как абсолютный показатель преломления воздуха при нормальном атмосферном давлении известен, то можно определить и абсолютный показатель преломления воздуха при измененном давлении. (Абсолютный показатель преломления сухого воздуха при температуре 15°C для  $\lambda = 545,5$  мкм равен  $n = 1,00027734$ ).

Пусть оптическая разность хода в трубках  $R_1$  и  $R_2$  кюветы

$$\delta = (n - n_0) L, \quad (1)$$

где  $\delta$  — разность хода,

$n_0$  — показатель преломления воздуха при атмосферном давлении,

$n$  — показатель преломления воздуха при измененном давлении,

$L$  — длина кюветы.

Пусть  $n - n_0 = \Delta n$ , тогда  $\delta = \Delta n \cdot L$  и

$$\Delta n = \frac{\delta}{L}. \quad (2)$$

В данной работе длина кюветы  $L = 1$  м. Значение  $\delta$  вычисляется по показателям микromетра с учетом того, что перемещение подвижной шкалы на одно деление соответствует изменению разности хода на  $1/30$  длины волны, т. е.

$$\delta = \frac{\lambda}{30} (K - K_0),$$

где  $K$  и  $K_0$  выражаются в мелких делениях микromетра. Таким образом,

$$\Delta n = \frac{\lambda (K - K_0)}{30L}. \quad (3)$$

По всем найденным значениям  $\Delta n$  можно построить график зависимости между изменением показателя преломления и изменением давления  $\Delta P$ .

### 4. Сопоставление опытных данных с теорией

Показатель преломления вещества зависит от его плотности. Подсчеты на основании электронной теории показывают, что некоторая функция показателя преломления и плотности вещества остается неизменной при изменении плотности вещества, а именно:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{D} = \text{const} \quad (\text{формула Лоренц-Лорентца}).$$

Здесь  $n$  — показатель преломления,  $D$  — плотность вещества.

Опыт подтверждает правильность этого соотношения даже при очень больших изменениях плотности, например, при переходе вещества из парообразного состояния в жидкое.

Величина  $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{D}$  называется удельной рефракцией вещества ( $r$ ). Пользуются также понятием атомной рефракции, которая равна удельной рефракции, умноженной на атомный вес, и понятием молекулярной рефракции — удельная рефракция, умноженная на молекулярный вес.

Для газов показатель преломления близок к единице, поэтому можно приближенно положить:

$$n^2 + 2 \approx 3, \quad n^2 - 1 = (n+1)(n-1) \approx 2(n-1).$$

Тогда получается следующее соотношение:

$$(n-1) \frac{1}{D} = \text{const.}$$

Следовательно,  $(n-1)$  пропорционально плотности газа, т. е.  $n-1 = CD$ , а так как плотность пропорциональна давлению, то мы можем также записать:

$$n-1 = C'P.$$

Напишем это выражение для воздуха при атмосферном давлении и для воздуха при данном давлении

$$n_0 - 1 = C'P_0,$$

$$n - 1 = C'P.$$

Вычитая из второго уравнения первое, получаем

$$n - n_0 = C'(P - P_0).$$

Обозначим  $n - n_0 = \Delta n$  и  $P - P_0 = \Delta P$ .

$$\text{Тогда } \Delta n = C' \Delta P. \quad (1)$$

Следовательно,  $\Delta n$  и  $\Delta P$  связаны линейной зависимостью, которая и проверяется в данной работе.

### При выполнении работы следует:

1. Определить нулевое положение шкалы интерферометра.
2. Произвести отсчет разности хода лучей при повышении давления в трубке  $R_2$  на 20, 40 и 60 мм рт. ст. (выше атмосферного давления).
3. Произвести отсчет разности хода лучей при понижении давления в трубке  $R_1$  на 20, 40 и 60 мм рт. ст. (ниже атмосферного давления).
4. Результаты занести в таблицу и построить график зависимости между изменением показателя преломления и изменением давления, откладывая по оси абсцисс  $\pm \Delta P$ , а по оси ординат  $\pm \Delta n$ .
5. Сопоставить результаты опыта с теорией.

Таблица 1

№ опы- та	$K_0$	$\Delta P_1$	$K_1$	$K_1 - K_0$	$\Delta n_1$	$\Delta P_2$	$K_2$	$K_2 - K_0$	$\Delta n_2$	$\Delta P_3$	$K_3$	$K_3 - K_0$	$\Delta n_3$
Измерения при давлениях выше атмосферного													
Измерения при давлениях ниже атмосферного													

### Контрольные вопросы

1. Используя график, найти давления для точек, соответствующих

$$\Delta n_1 = -0,000015$$

$$\Delta n_2 = +0,00001$$

2. Теоретически определить условия главных максимумов и минимумов при дифракции от двух щелей.

3. Начертить оптическую схему интерферометра Рэлея.

4. Объяснить, как получается интерференционная картина в данном интерферометре.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Зисман и О. М. Годес. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1968, § 13—14.  
 2. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Гостехиздат, 1957, § 46.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

**Принадлежности:** гониометр, дифракционная решетка, источник света, дающий линейчатый спектр (неоновая лампа или спектральная трубка).

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Дифракция — проявление волновой природы света. Она состоит в том, что свет огибает препятствия на своем пути, частично попадая в области тени. Явление дифракции может быть объяснено на основе принципа Гюйгенса-Френеля.

Согласно принципу Гюйгенса, каждый элемент волновой поверхности является центром элементарных волн, причем огибающая этих элементарных волн будет волновой поверхностью в следующий момент времени (рис. 1). Принцип Гюйгенса описывает распространение волн в согласии с законами геометрической оптики, но не объясняет явление дифракции.

Френель дополнил принцип Гюйгенса, введя представление о когерентности элементарных волн и их интерференции. По принципу Гюйгенса-Френеля, волновое возмущение в некоторой точке  $P$  можно рассматривать как результат интерференции фиктивных элементарных волн, излучаемых каждым элементом распространяющейся волновой поверхности.

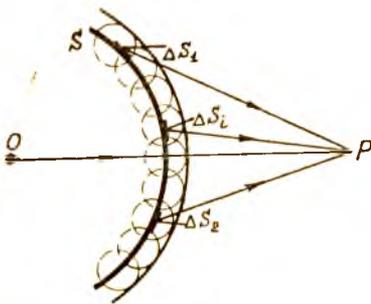


Рис. 1

На рис. 1 такой поверхностью является сферическая поверхность волны  $S$ , излучаемой точечным источником  $O$ .

Амплитуда колебаний в рассматриваемой точке  $P$  может быть найдена, если известны амплитуды и фазы складывающихся в ней колебаний, приходящих от различных элементов  $\Delta S_i$  волновой поверхности.

Практически важным случаем дифракции света является дифракция при прохождении параллельного пучка лучей через дифракционную решетку. Дифракционной решеткой называется система очень большого числа параллельных друг другу узких щелей одинаковой ширины, отделенных друг от друга равными по ширине узкими непрозрачными промежутками.

Рассмотрим сначала дифракцию от одной щели. Пусть на бесконечно длинную щель падает плоская световая волна (рис. 2). Поместим за щелью собирающую линзу, а в фокальной плоскости линзы — экран. Разобьем открытую часть волновой поверхности (т. е. ту часть падающей волны, которая проходит через щель) на параллельные краям щели элементарные зоны шириной  $dx$ . Вторичные волны, посылаемые этими зонами под углом  $\varphi$  к оптической оси линзы, соберутся в некоторой точке экрана  $P$ , где, интерферируя между собою, возбуждают суммарное колебание оптического

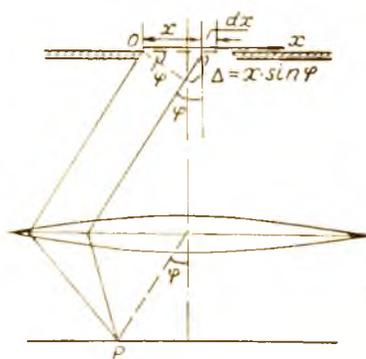


Рис. 2

вектора  $y$ . (Оптическим вектором будем называть вектор напряженности электрического поля световой волны). Величину его модуля нетрудно найти путем интегрирования (см.: И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, 1967, § 24).

При этом получается:

$$y = A_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi\right)}{\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi\right),$$

где  $b$  — ширина щели,

$\lambda$  — длина световой волны,

$A_0$  — алгебраическая сумма амплитуд колебаний, посылаемых в данном направлении всеми элементарными зонами.

Амплитуда результирующего колебания в точке  $P$ , следовательно, равна

$$A_{\varphi} = \left| A_0 \frac{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi \right)}{\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi} \right|. \quad (1)$$

Равенство (1) показывает, что освещенность экрана зависит от угла дифракции  $\varphi$ .  $A_{\varphi}$  обращается в нуль для углов  $\varphi$ , удовлетворяющих условию:

$$\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi = \pm k\pi, \quad \text{где } k = 1, 2, 3, \dots$$

т. е. при

$$\sin \varphi = \pm \frac{k\lambda}{b}. \quad (2)$$

Условие (2) определяет положение минимумов амплитуды, а значит, и освещенности экрана. В промежутках между минимумами находятся места максимальной освещенности. Наибольший максимум имеет место, когда

$$\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi = 0, \quad \text{т. е. } \varphi = 0; \quad \text{при этом } A_{\varphi} = A_0.$$

Этот максимум будем называть нулевым.

Все другие максимумы располагаются симметрично относительно нулевого и значительно уступают ему по яркости. Их места соответствуют значениям  $\varphi$ , при которых выполняются условия:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi = 1,43\pi; \quad \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi = 2,46\pi; \\ \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi = 3,47\pi; \quad \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi = 4,47\pi \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (3)$$

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды:  $I = \kappa A^2$ . Следовательно,

$$I_{\varphi} = \frac{I_0 \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi \right)}{\left( \frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi \right)^2}. \quad (1')$$

Функция распределения интенсивности (1') представлена графически на рис. 3.

Теперь рассмотрим прохождение света через дифракционную решетку. Пусть параллельный пучок монохроматического света падает на дифракционную решетку  $R$  по направлению нормали к ее плоскости (рис. 4).

Обозначим ширину каждой щели буквой  $b$ , а ширину непрозрачного промежутка между щелями  $a$ . Сумма  $a + b = d$  называется периодом или постоянной дифракционной решетки. Расположим параллельно решетке собирающую линзу, в фокальной плоскости которой поставим экран. Каждая из щелей даст на эк-

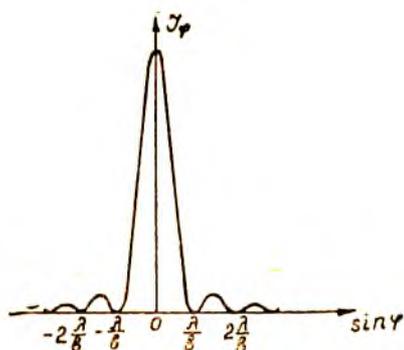


Рис. 3

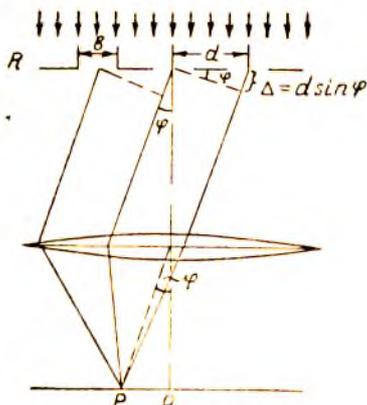


Рис. 4

ране картину, описываемую графиком, изображенным на рис. 3. Если бы колебания, приходящие в точку  $P$  от различных щелей, были некогерентными, то результирующая картина от  $N$  щелей отличалась бы от картины, создаваемой одной щелью, лишь тем, что освещенность во всех точках дифракционной картины на экране возросла бы в  $N$  раз. Однако световые пучки, приходящие в точку  $P$  от различных щелей, являются когерентными; поэтому для нахождения результирующей интенсивности нужно учесть явление интерференции их. Для этого можно воспользоваться векторной диаграммой.

Представив результирующие амплитуды колебаний, приходящих от различных щелей, в виде векторов  $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{A}_3$  и т. д., направления которых отличаются последовательно на величину разности фаз  $\delta$ , обусловленной разностью хода  $\Delta$  соседних пучков, найдем суммарную амплитуду колебаний, создаваемых в точке  $P$  экрана всеми щелями:

$$\vec{A} = \sum_{i=1}^N \vec{A}_i, \quad \text{где } N \text{ — число щелей.}$$

Модули векторов  $\vec{A}_i$  одинаковы и определяются формулой (1). Угол же  $\delta$  между соседними векторами определяется соотношением

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}. \quad (4)$$

Как это видно из рис. 4,

$$\Delta = d \sin \varphi. \quad (5)$$

Таким образом,

$$\delta = \frac{2\pi d \sin \varphi}{\lambda}. \quad (6)$$

Для направлений, удовлетворяющих условию (2), все  $A_i$  равны нулю. Поэтому условие (2) минимумов для одной щели является также условием минимумов для решетки.

При тех значениях угла дифракции  $\varphi$ , для которых выполняется условие  $\delta = \pm 2m\lambda$ , где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ , направления векторов складываемых амплитуд совпадают. Для этих направлений, следовательно, получаются одинаковые по величине максимумы

$$A_{\max} = NA_{\varphi}, \quad (7)$$

которые называются главными. Принимая во внимание формулу (6), находим условие, определяющее места главных максимумов дифракционной картины на экране:

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

Число  $m$  указывает порядковый номер главного максимума, считая от нулевого как влево, так и вправо. Его принято называть порядком соответствующего главного максимума.

Интенсивность главных максимумов

$$I_{\max} = N^2 I_{\varphi}. \quad (9)$$

Следовательно, яркость главных максимумов прямо пропорциональна квадрату числа действующих щелей решетки. Между двумя соседними главными максимумами располагаются  $(N-1)$  добавочные минимумы. Эти минимумы обусловлены интерференцией колебаний, возбуждаемых действием различных щелей, они формулой (2) не учитываются. Из анализа векторных диаграмм сложения амплитуд (см., например, И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, 1967 г., § 25) получается условие для добавочных минимумов:

$$d \sin \varphi = \pm \frac{n}{N} \lambda \quad (n = 1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots, 2N-1, 2N+1, \dots) \quad (10)$$

Число  $n$  принимает все целочисленные значения, кроме  $0, N, 2N, \dots$ , т. е. кроме тех, при которых условие (10) переходит в (8), т. е. в условие максимума.

Между дополнительными минимумами располагаются слабые вторичные максимумы. Их число, как нетрудно сообразить, равно  $N-2$ . На рис. 5 представлена графически дифракционная картина от решетки при освещении ее монохроматическим светом.

На этом рисунке отчетливо видно, что главные максимумы получаются в виде узких ярких линий, разделенных очень слабо освещенными относительно широкими полосами. Чем больше число действующих щелей  $N$ , тем ярче и уже главные максимумы.

Расстояние между главными максимумами, как это видно из формулы (8), зависит от длины волны света. Чем больше  $\lambda$ , тем больше это расстояние. Поэтому при освещении решетки немонахроматическим светом все главные максимумы, кроме нулевого, образуют спектры, обращенные к нему фиолетовой частью. При

освещении решетки белым светом нулевой максимум оказывается белым, а все другие получаются в виде сплошных спектров. Чем выше порядок спектра, тем больше он растянут. Если решетка освещается светом лишь некоторых отдельных длин волн, например, от светящейся водородной или неоновой газоразрядной трубки, то дифракционные спектры получаются линейчатыми.

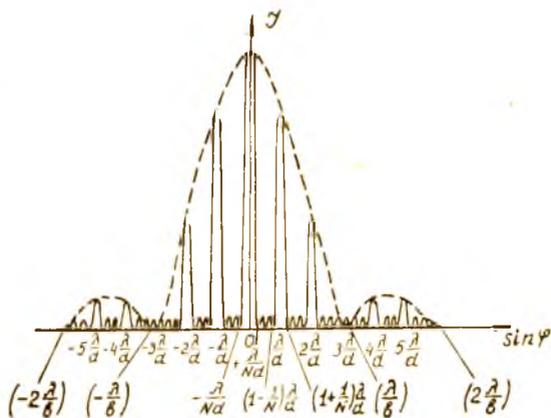


Рис. 5

С помощью дифракционной решетки можно измерять длины световых волн  $\lambda$ , соответствующих той или иной спектральной линии. Для этого достаточно измерить на опыте соответствующие углы дифракции  $\varphi$ , зная постоянную решетки, вычислить длины волн. Из формулы (8) следует, что

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{m} . \quad (11)$$

Измерение углов производят при этом с помощью специальных гониометров.

На практике применяют дифракционные металлические или стеклянные решетки различных типов. Стеклянные дифракционные решетки изготовляют, проводя алмазом на стекле (с помощью делительной машины) на равном и очень малом расстоянии друг от друга прямолнейные параллельные бороздки. Число бороздок на 1 см достигает 10—15 тысяч. На рис. 6 схематически показан в сильно увеличенном виде разрез такой решетки.

В настоящее время часто используются, особенно в учебных целях, так называемые реплики, которые представляют собой желатиновые отпечатки со стеклянных дифракционных решеток.

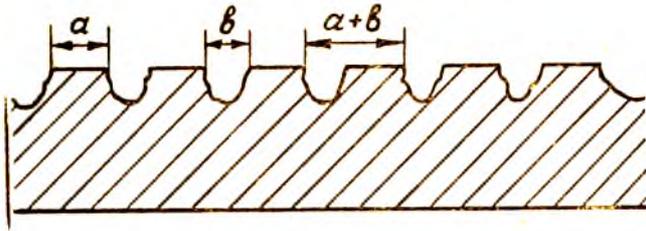


Рис. 6

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Для измерения углов дифракции в данной работе применяется упрощенный гониметр УГ-3. Он состоит из коллиматора  $SL_1$  (рис. 7), укрепленного неподвижно на горизонтально расположен-

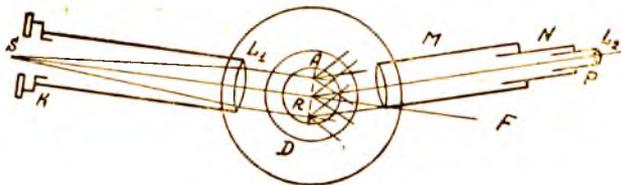


Рис. 7

ном металлическом диске  $D$ . На этом диске имеются два диаметрально противоположных угловых нониуса. Вдоль кромки диска скользит лимб — кольцо с делениями, ось которого совпадает с осью диска. По нему с помощью угловых нониусов производится отчет углов дифракции.

С лимбом скреплена зрительная труба, состоящая из трех частей: трубы  $M$ , в которой находится объектив, трубы  $N$ , в передней части которой расположена нить  $f$ , и трубы  $P$ , свободно двигающейся в трубе  $N$  вдоль ее оси. В конце трубы  $P$  находится окуляр зрительной трубы  $L_2$ .

Выше диска  $D$ , коаксиально с ним, расположен свободно вращающийся вокруг оси гониметра столик  $A$ , на который ставится дифракционная решетка.

Назначение коллиматора — создавать параллельный пучок света. Коллиматор состоит из наружного тубуса, в котором укреплена линза  $L_1$ , и внутреннего тубуса с вертикальной щелью  $S$ . Эта щель должна быть параллельной штрихам дифракционной решетки. Ширина щели регулируется микрометрическим винтом  $K$ . Если установить щель коллиматора в фокальной плоскости линзы  $L_1$  и направить на нее свет вдоль оптической оси, то из объектива будет выходить пучок света, который в результате действия дифракцион-

ной решетки образует дифракционную картину в фокальной плоскости объектива зрительной трубы. Ее может видеть наблюдатель с помощью окуляра.

Для наблюдения дифракционной картины и измерения углов дифракции зрительная труба должна быть соответствующим образом настроена по глазу наблюдателя. Прежде всего ее фокусируют на визирную нить  $f$ , для чего направляют на свет  $n$ , перемещая трубу  $P$  относительно трубы  $N$ , добиваются наиболее ясной видимости нити  $f$ . В таком взаимном положении трубы  $P$  и  $N$  должны находиться все время работы одного и того же наблюдателя с данным гониометром. Затем зрительную трубу устанавливают на бесконечность. Для этого наводят ее на какой-либо удаленный предмет и перемещением трубы  $N$  вместе с  $P$  добиваются ясной видимости его. Четкость изображения нити  $f$  при этом должна сохраниться.

Гониометр с настроенной таким образом зрительной трубой устанавливают на рабочем столе и направляют свет от источника на щель коллиматора. После этого продолжают его настройку. Располагают оси коллиматора и зрительной трубы по одной прямой так, чтобы в трубу можно было увидеть изображение освещенной щели коллиматора. Затем расширяют щель настолько, чтобы на фоне ее хорошо была видна нить. Изображение щели сначала может оказаться недостаточно резким. В этом случае, передвигая щель  $S$  относительно объектива коллиматора, добиваются необходимой резкости. Добившись резкого изображения, щель сужают, следя за тем, чтобы нить трубы все время была хорошо видна на фоне изображения щели. Изображение щели для работы должно быть примерно в два раза шире нити. На этом установку прибора можно считать законченной.

### Указания к пользованию нониусом

На лимбе нанесены градусные и полуградусные деления, так что по лимбу можно отсчитывать углы с точностью до половины градуса. Такая точность для нашего опыта недостаточна.

Чтобы уточнить измерения, нужно пользоваться нониусом. Нониус на нашем гониометре сделан так, что 29 делениям (полуградусным) лимба соответствуют 30 делений нониуса. Величина каждого деления нониуса составляет, таким образом, 29 минут.

Разность между ценой деления шкалы на лимбе ( $30'$ ) и величиной деления нониуса ( $29'$ ), равная одной минуте, представляет собой точность нониуса.

Отсчет производится следующим образом. Отсчитывается число градусных и полуградусных делений лимба (счет идет от нуля лимба), укладывающихся до нулевого деления нониуса. Затем отыскивается деление нониуса, совпадающее с каким-либо делением лимба. Номер совпадающего деления нониуса и будет равен числу минут, которое нужно прибавить к отсчету на лимбе.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе задача заключается в определении длины волны одной из наиболее ярких линий в спектре газоразрядного источника света. После того, как гониометр установлен, на его столик помещается дифракционная решетка. Штрихи решетки должны быть вертикальными, и пучок света, выходящий из коллиматора, должен падать на нее нормально. Установка решетки производится на глаз.

Вращая трубу, нужно убедиться, что справа и слева от нулевого максимума хорошо видны по меньшей мере спектры 1-го и 2-го порядка. При этом следует иметь в виду, что спектры газообразного источника (атомарного) имеют линейчатую структуру. Если с одной стороны спектры видны слабо, то, немного повертывая решетку и перемещая ее на столике, следует добиться одинаково хорошей видимости спектров с обеих сторон. После этого можно приступить к определению углов дифракции. Делается это так. Повертывая трубу, устанавливают визирную нить трубы, например, на желтую линию в правом спектре первого порядка. Отсчет углов производят по двум нониусам во избежание ошибки на эксцентриситет. Записав показания по обоим нониусам  $n_1$  и  $n_1'$ , переводят трубу в новое положение так, чтобы нить совпала с желтой линией в левом спектре первого порядка, и снова записывают показания обоих нониусов ( $n_2$  и  $n_2'$ ). Затем вычисляют значение угла дифракции  $G$  для данной линии в спектре первого порядка:

$$\varphi_{11} = \frac{n_2 - n_1}{2}, \quad \varphi_{12} = \frac{n_2' - n_1'}{2};$$
$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{11} + \varphi_{12}}{2}.$$

Аналогичным образом находят углы дифракции для той же линии в спектре второго и, если возможно, третьего порядка.

По полученным значениям  $\varphi_{m\pi}$  вычисляют длину волны для каждого угла дифракции ( $\lambda_1$ ;  $\lambda_2$ ;  $\lambda_3$ ), согласно формуле

$$\lambda_m = \frac{d \sin \varphi_m}{m},$$

где  $m$  — соответствующий порядок спектра. Постоянная решетки в нашем опыте  $d = 0,01$  мм.

Окончательный результат находят как среднее арифметическое из найденных значений

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}.$$

Длину волны вычисляют в микронах с точностью до третьего десятичного знака.

Результаты измерений и вычислений следует занести в таблицу, форма которой приведена ниже.

Таблица результатов измерений

Порядок спектра $m$	Правый спектр		Левый спектр		Угол дифракции			Длина волны $\lambda, \mu$
	Отсчет по правому нониусу $n_1$	Отсчет по левому нониусу $n_1'$	Отсчет по правому нониусу $n_2$	Отсчет по левому нониусу $n_2'$	$\varphi_{m1} = \frac{n_2 - n_1}{2}$	$\varphi_{m2} = \frac{n_2' - n_1'}{2}$	$\varphi_m = \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2}$	
1								
2								
3								

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} = \dots$$

### Контрольные вопросы

1. Объясните, почему спектры, полученные от дифракционной решетки, обращены к нулевому максимуму фиолетовой частью.
2. Какой наибольший порядок спектра можно видеть при помощи дифракционной решетки, имеющей 500 линий на 1 мм, если пользоваться светом с длиной волны  $\lambda = 0,590 \mu$ ?
3. Сделайте оценку точности полученного вами результата.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг. Оптика. Гостехиздат, М., 1957, § 41, 45, 47.
2. Н. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, изд. «Наука», М., 1967, § 21, 24, 25.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНОГО РАСТВОРА САХАРА ПО ВРАЩЕНИЮ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

**Принадлежности:** поляриметр типа СМ, сахариметр СУ-2, поляриметрические трубки, дистиллированная вода, растворы сахара различной концентрации, весы и пикнометр или весы Вестфалья.

В оптических методах экспериментальных исследований, а также в различного рода технических устройствах все шире используются явления поляризации света. Объясняется это, с одной стороны, тем, что разнообразие, простота, точность и надежность методов, использующих законы поляризации и взаимодействия поляризованного света с веществом, делают их особенно удобными, а во многих случаях и вообще незаменимыми. С другой стороны, в последние десятилетия решена проблема массового промышленного производства поляризующих пленок-поляроидов, применение которых делает указанные методы общедоступными.

Целью данной работы является ознакомление с поляриметрическим методом определения концентрации растворов оптически активных веществ — сахариметрией. Этот метод широко применяется в лабораториях химической, нефтяной и пищевой промышленности. Для понимания физического смысла предлагаемой работы необходимо иметь сведения о явлениях поляризации света. Их можно почерпнуть из любого современного курса общей физики, предназначенного для высших учебных заведений (см. список рекомендуемой литературы).

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Оптически активными называют те вещества, которые обладают свойством вращать плоскость поляризации проходящего через них света. Таких веществ в природе много. Одни из них являются

оптически активными только в кристаллическом состоянии (кварц, киноварь), другие — в различных агрегатных состояниях (винная кислота, скипидар, сахар и др.).

Есть вещества, которые вращают плоскость поляризации по часовой стрелке (если смотреть навстречу лучу, рис. 1). Такие вещества называются правовращающими (сахароза, глюкоза, правый кварц и др.). Другие вещества вращают плоскость поляризации против часовой стрелки (рис. 2). Их называют левовращающими (фруктоза, левый кварц и др.).

Для однородных оптически активных веществ имеет место экспериментально установленный закон:

$$\varphi = \alpha l, \quad (1)$$

т. е. угол поворота плоскости поляризации  $\varphi$  прямо пропорционален пути  $l$  света в оптически активной среде (в одном направлении). Коэффициент  $\alpha$  называют постоянной вращения. Для кристаллов постоянную вращения принято выражать в угловых градусах на миллиметр. Она зависит от длины волны света  $\lambda$  («дисперсия оптической активности», «вращательная дисперсия») и от температуры. Зависимость величины  $\alpha$  от длины волны света сильно выражена. Например, в случае распространения света вдоль оптической оси в кристалле кварца для желтых лучей ( $\lambda = 0,5890 \text{ мк}$ )  $\alpha = 21,7 \text{ град/мм}$ , а для фиолетовых лучей ( $\lambda = 0,4047 \text{ мк}$ )  $\alpha = 48,9 \text{ град/мм}$ .

Установлено также, что постоянная вращения раствора оптически активного вещества в неактивном растворителе прямо пропорциональна числу молекул растворенного вещества в единице объема раствора, т. е. прямо пропорциональна весо-объемной концентрации раствора  $c$ . Для таких растворов

$$\varphi = [\alpha] cl. \quad (2)$$

Коэффициент  $[\alpha]$  называют удельной постоянной вращения растворенного вещества. Концентрацию раствора  $c$  выражают в граммах на  $1 \text{ см}^3$  раствора. Вместо нее часто берут величину  $C = 100 c$ , т. е. число граммов растворенного вещества, содержащееся в  $100 \text{ см}^3$  раствора. При весо-весовом выражении концентрация раствора  $K$

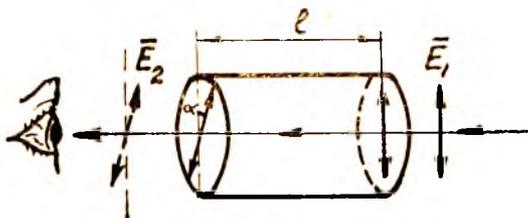


Рис. 1

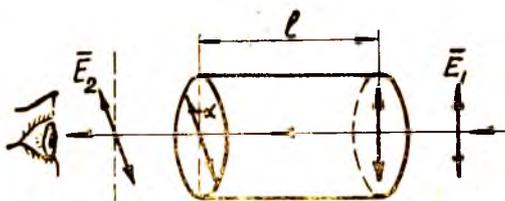


Рис. 2

равна отношению, взятому в процентах, веса растворенного вещества  $P_1$  к весу раствора  $P_1 + P_2$ , т. е. к суммарному весу растворенного вещества и растворителя:

$$K = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Выражая величину  $C$  через  $P$  и удельный вес раствора  $d$ , можно формулу (2) записать так:

$$\varphi = [\alpha] \frac{Kd}{100} \cdot l. \quad (4)$$

Это соотношение и используется в сахариметрии для определения концентрации  $K$  растворов оптически активных веществ по заранее определенным значениям удельных постоянных вращения  $[\alpha] = \frac{\varphi}{Kld} \cdot 100$ .

Величины  $l$  и  $d$  определяются обычными методами.

Измерение угла поворота плоскости поляризации  $\varphi$  производится с помощью специального прибора — поляриметра. Принцип действия такого прибора поясняется схемой, представленной на рис. 3.

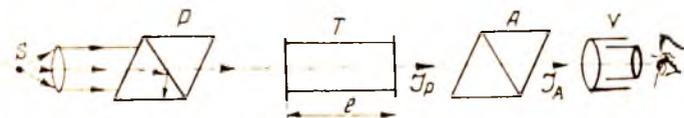


Рис. 3

Основными частями поляриметра являются поляризатор  $P$  и анализатор  $A$  — поляризующие призмы, например, николи или поляроиды. Между ними помещается трубка  $T$ , наполненная исследуемой жидкостью. Концы трубки закрыты плоскопараллельными покровными стеклами. Для улучшения условий наблюдения применяется зрительная труба  $V$ , которая обычно фокусируется на поверхность поляризатора  $P$ .

Предположим, что трубка  $T$  с исследуемым веществом отсутствует. Тогда параллельный пучок света от источника  $S$  проходит последовательно через поляризатор  $P$  и анализатор  $A$ , затем попадает в зрительную трубу  $V$ . При этом наблюдатель видит равномерно освещенное поле зрения, яркость которого определяется интенсивностью  $I_A$  пучка света, прошедшего через анализатор. Интенсивность же  $I_A$  света, выходящего из анализатора, в свою очередь, определяется интенсивностью  $I_p$  поляризованного света, поступающего в него, и углом  $\varphi_A$ , который составляют между собой плоскость колебаний этого света и главное сечение анализатора  $A$ . Согласно известному закону Малюса,

$$I_A = I_p \cdot \cos^2 \varphi_A. \quad (5)$$

Если поляризатор и анализатор при отсутствии трубки  $T$  скрещены, т. е.  $\varphi_A = \frac{\pi}{2}$ , то  $I_A = 0$  и поле зрения, наблюдаемое в трубу  $V$ , оказывается темным.

Если  $\varphi_A = 0$ , то  $I_A = I_p$  и поле зрения имеет максимальную яркость. Вообще, вращая анализатор вокруг луча как оси, наблюдатель замечает изменение яркости поля зрения в соответствии с законом Малюса.

Теперь предположим, что поляризатор и анализатор устанавливаются на угол  $\varphi_A = \frac{\pi}{2}$  (поле зрения темное), а затем между ними помещается поляриметрическая трубка с дистиллированной водой. Поле зрения остается темным, т. к. вода оптически неактивна, т. е. не меняет направления плоскости поляризации света, проходящего через нее. Если наполнить трубку  $T$  водным раствором сахара, то плоскость поляризации света, проходящего через нее, повернется на некоторый угол  $\varphi$ , определяемый соотношением (4), и поле зрения станет светлым. Повернув анализатор на тот же угол, наблюдатель восстановит темное поле зрения, а измерив этот угол поворота анализатора, он тем самым определит угол  $\varphi$  поворота плоскости поляризации света в трубке с раствором сахара. При этом следует обратить внимание на два обстоятельства, в значительной степени определяющих точность измерения угла  $\varphi$ . Рассмотрим их.

**1. Влияние вращательной дисперсии.** Угол поворота плоскости поляризации оптически активным веществом является функцией длины волны света. Поэтому в описанном опыте следует пользоваться монохроматическим светом, например, желтым светом натриевого источника света. При использовании белого света невозможно восстановить темное поле зрения поворотом анализатора после помещения в поляриметр трубки с раствором сахара, т. к. при любом положении анализатора поле зрения будет окрашенным в тот или иной цвет. В современных поляриметрах для уменьшения влияния вращательной дисперсии и вообще для более точного измерения углов вращения плоскости поляризации света применяют специальные устройства — кварцевые компенсаторы. Существуют компенсаторы различной конструкции.

Рассмотрим в качестве примера компенсатор Солейля (рис. 4).

Он состоит из двух плоскопараллельных кварцевых пластин  $L$  и  $P$ , вырезанных перпендикулярно оптической оси кристаллов. Одна пластинка вырезана из левого кварца  $L$  и имеет постоянную толщину. Другая сделана из правого кварца  $P$ . Она состоит из двух клиньев. Перемещая один из этих клиньев перпендикулярно оптической оси прибора, можно изменять суммарную их толщину.

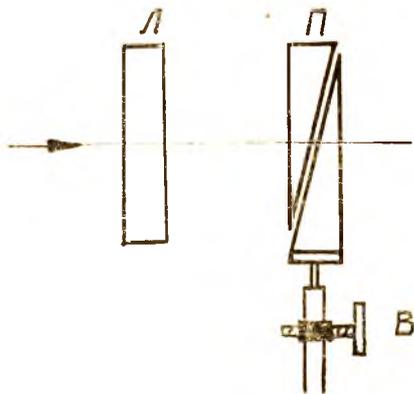


Рис. 4

Можно сказать, что оба клина составляют плоскопараллельную пластину с изменяемой по желанию экспериментатора толщиной.

Если правовращающая пластинка толще левовращающей, то плоскость поляризации света, проходящего через обе пластинки, поворачивается вправо. Наоборот, если правовращающая пластинка тоньше левовращающей, то плоскость поляризации света, проходящего через них, поворачивается влево. Таким образом, перемещая с помощью микрометрического винта В подвижной клин, экспериментатор может вращать плоскость поляризации света по своему усмотрению, влево или вправо.

С подвижным клином соединяется линейная шкала, скользящая около неподвижного указателя (нонуса). Эта шкала градуируется так, что по ней непосредственно отсчитывается угол, на который компенсатор поворачивает плоскость поляризации проходящего света.

Если поместить кварцевый компенсатор в поляриметр на пути луча между трубкой Т и анализатором, то компенсацию действия раствора можно осуществлять уже не вращением анализатора, а перемещением подвижного клина компенсатора. При этом компенсируется также вращательная дисперсия света в растворе, что облегчает измерения и делает их значительно более точными. В поляриметрах с кварцевыми компенсаторами, предназначенных для исследования оптической активности растворов, так называемых сахариметрах, анализатор и поляризатор закрепляются в определенном положении, т. к. вращать их нет необходимости.

**2. Влияние чувствительности глаза.** При визуальных наблюдениях не следует забывать о зависимости чувствительности глаза от спектрального состава и от интенсивности попадающего в него света. Например, воспринимаемые яркость и цвет поля зрения, одна окраска которого сменяется другой, зависят от чередования цветов (цветовая адаптация глаза). Поэтому восстановление «на глаз» яркости окрашенного поля зрения, видимого в окуляр поляриметра, далеко не всегда оказывается точным.

Кроме цветовой адаптации, имеет место также световая и темновая адаптации. Чувствительность глаза в случае перехода от темноты к яркому свету убывает в десятки тысяч раз. При средних яркостях световая адаптация занимает всего 1—3 минуты. При переходе от яркого света к темноте чувствительность глаза соответственно возрастает, сначала очень быстро, а затем медленно. Время полной темновой адаптации составляет 1—3 часа. При визуальных наблюдениях влияние адаптации глаза на точность измерений должно быть исключено.

В фотометрии используется свойство глаза улавливать даже незначительную разницу в яркости граничащих между собой частей поля зрения. Это свойство глаза особенно хорошо проявляется при малых яркостях, когда чувствительность сетчатки достаточно высокая. При больших яркостях чувствительность глаза снижается, и свойство его различать нюансы освещенности притупляется. По

этой причине в поляриметрии обычно применяют полутеневой метод с разделением поля зрения на две слабо освещенные части.

В качестве анализаторов или поляризаторов в полутеневых сахариметрах устанавливаются особые поляризующие призмы (или поляроиды), называемые полутеневыми. Полутеневой поляризатор делит поле зрения на две части с различным направлением поляризации. Он состоит из двух поляризаторов, главные сечения которых  $P_1$  и  $P_2$  образуют между собой малый угол  $\beta$  (рис. 5).

Если анализатор установлен так, что его главное сечение  $AA$  перпендикулярно биссектрисе угла  $\beta$ , то обе половины поля зрения,

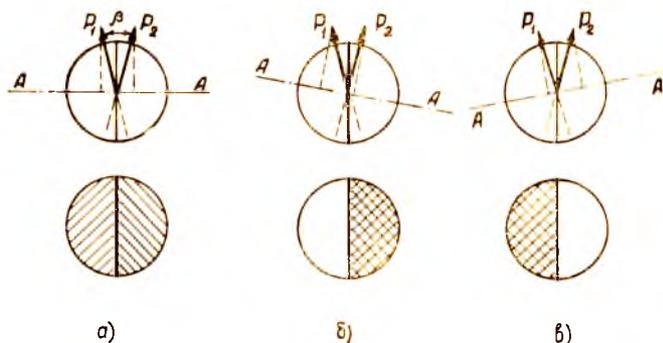


Рис. 5

видимого в окуляр прибора без трубки  $T$ , будут одинаково слабо освещенными (рис. 5,а). Малейший поворот анализатора вправо (или соответствующее перемещение клина компенсатора) вызовет заметное посветление левой и потемнение правой частей поля зрения (рис. 5,б).

Поворот его влево, напротив, вызовет потемнение левой и посветление правой половины (рис. 5,в).

Чем меньше угол  $\beta$ , тем меньше яркость и больше чувствительность поля зрения к повороту анализатора. Подобные призмы делают с углом  $\beta = 2 \div 3^\circ$ .

Полутеневой поляризатор можно сделать из николя. Для этого достаточно разрезать его вдоль по диагональному сечению, как показано на рис. 6,а, сошлифовать каждую половину на угол  $\frac{\beta}{2}$  и склеить их по возможности тонким слоем бесцветного клея (рис. 6,б).

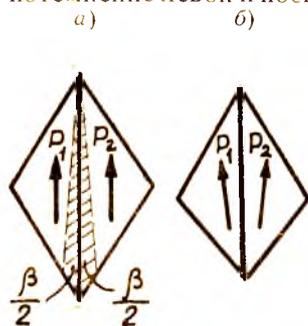


Рис. 6

Применение в сахариметрии полутеневых поляризаторов

в значительной степени облегчает визуальные наблюдения и делает измерения более точными.

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ

1. Поляриметр круговой СМ. Этот прибор предназначен для измерения углов вращения плоскости поляризации света оптически активными жидкостями в пределах  $\pm 360^\circ$  с точностью до  $\pm 0,1^\circ$ . Его фотометрическое поле зрения тройное, устанавливается на полутьпу вращением анализатора.

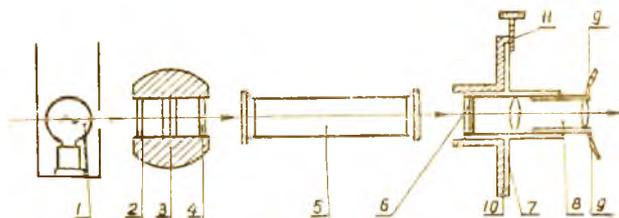


Рис. 7

На рис. 7 представлена оптическая схема поляриметра кругового СМ. Свет от источника с матовой поверхностью 1 проходит последовательно через цветной светофильтр 2, поляризатор (поляроид) 3, диафрагму с плоскопараллельной кварцевой пластинкой 4, поляриметрическую трубку 5, анализатор (поляроид) 6, зрительную трубу 8 и, наконец, попадает в глаз наблюдателя. Анализатор можно вращать вокруг оси прибора с помощью специального фрикциона 11. Вместе с анализатором вращается зрительная труба и диск 7, на диаметрально противоположных краях которого нанесены два нуля, скользящих вдоль лимба 10. С помощью нульбусов можно отсчитывать по лимбу углы поворота анализатора от 0 до  $360^\circ$  с точностью до  $0^\circ,05$ . Отсчет производится через две лупы 9, вставленные в раковину окуляра.

Поляризатор 3 установлен неподвижно. Свет из него выходит поляризованным линейно.

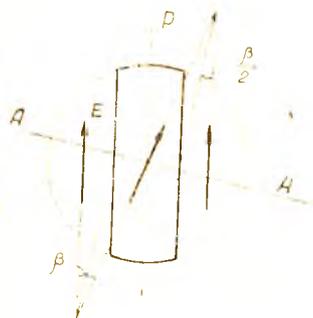


Рис. 8

Диафрагма 4 с кварцевой пластинкой в средней части ее делит поле зрения на три части, как показано на рис. 8. Этот рисунок нужно представить себе так, что свет идет из-за чертежа к наблюдателю. Стрелки указывают направление колебаний электрического вектора. Кварцевая пластинка поворачивает плоскость поляризации средней части пучка света вправо на небольшой угол  $\beta$ .

Если установить анализатор так, что его главная плоскость  $AA$

окажется перпендикулярной главной плоскости  $PP$  поляризатора, то, в случае отсутствия поляриметрической трубки 5 крайние части поля зрения будут темными, а средняя — светлой.

Если затем повернуть анализатор на угол  $\frac{\beta}{2}$  так, чтобы направление  $AA$  стало перпендикулярным бисектрисе угла  $\beta$ , то средняя часть несколько потемнеет, а крайние в той же степени посветлеют. Все поле зрения окажется равномерно освещенным (полутень). При таком положении один из нульсусов должен указывать  $0^\circ$  (нулевой отчет).

Если повернуть анализатор еще на угол  $\frac{\pi}{2}$ , то его главная плоскость станет параллельной бисектрисе угла  $\beta$ . При этом яркость поля зрения также окажется одинаковой во всех частях, но настолько большой, что точная установка на однородность его будет невозможной.

При всех остальных положениях анализатора фотометрическое поле зрения будет неоднородным. Этим и пользуются при измерениях углов поворота плоскости поляризации света.

Чувствительность полутеневого фотометрического поля зрения зависит от угла  $\beta$ . В данном приборе  $\beta \sim 5 \div 7^\circ$ .

Во время наблюдений зрительную трубу фокусируют на выходную поверхность диафрагмы 4. При этом линии, разделяющие поле зрения, оказываются очень тонкими и четкими. Фокусирование производится перемещением муфты трубы вдоль ее оси, а не путем вращения.

**2. Сахариметр универсальный типа СУ-2.** Этот прибор предназначен для определения концентрации сахара в растворах. Пределы измерений от  $-40$  до  $+100^\circ S$ . Допустимая погрешность равна  $\pm 0,1^\circ S$ . Знак  $S$  указывает на то, что берутся не угловые, а так называемые международные сахарные градусы.  $100^\circ S$  соответствуют  $34^\circ$ ,  $62$  угловым. Сахариметр показывает  $100^\circ S$ , когда в поляриметрической трубке длиной  $200$  мм находится раствор, содержащий при  $20^\circ C$   $26$  граммов сахарозы в  $100$  см<sup>3</sup> раствора.

На рис. 9 представлена оптическая схема сахариметра СУ-2. Свет от осветительной лампочки 1 проходит вдоль оптической оси прибора последовательно через светофильтр 2—3, конденсор 4, полутеневую призму (поляризатор) 5, защитное стекло 6, поляриметрическую трубку 7, защитное стекло 7, кварцевый компенсатор 8—9—10, полярионд (анализатор) 11, зрительную трубу 12.

Отсчет показаний осуществляется по шкале 14 и нульсусу 15 через верхнюю двуклинзовую лупу 16. Шкала освещается от лампочки 1 с помощью призмы полного внутреннего отражения 13.

Зрительная труба фокусируется на выходную грань полутеневой призмы.

Компенсатор несколько отличается своей конструкцией от описанного нами компенсатора Солейля, но принцип действия его тот же самый. Он состоит из подвижного кварцевого (левого) клина 8,

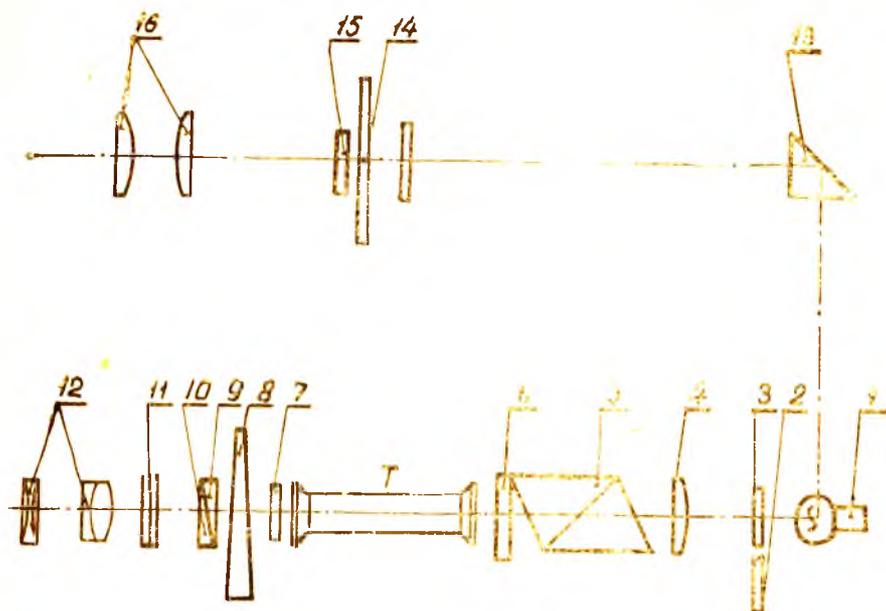


Рис. 9

неподвижного кварцевого (правого) клина 10 и стеклянного клина 9. Этот стеклянный клин («подклинок», «контрклин») компенсирует преломление света в кварцевых клиньях. Переменение подвижного клина и шкалы осуществляется одновременно с помощью кремальеры так, что нулевой отчет шкалы соответствует нейтральному положению компенсатора. Вращению угла поля зрения влево соответствуют положительные показания шкалы, а вправо — отрицательные.

Вращательная дисперсия сахарного раствора почти точно компенсируется вращательной дисперсией кварцевого компенсатора. Поэтому можно пользоваться белым светом. Если же раствор очень прозрачен и фотометрическое поле получается слишком ярким, то вводят темный красный светофильтр 2.

## Упражнение 1

### Определение весо-объемной концентрации раствора сахара методом однократного сравнения

Это упражнение выполняется с целью ознакомления с действием описанного поляриметра кругового СМ. Для выполнения упражнения необходимо получить у лаборанта три поляриметрические трубки с чистыми растворами сахара одного и того же сорта, по

различной концентрации. Концентрация раствора в одной из трубок известна. Будем называть эту трубку эталонной. Концентрации растворов, содержащихся в двух других трубках, неизвестны. Их нужно определить

### Порядок выполнения упражнения 1

1. Ознакомиться с конструкцией поляриметра путем внешнего осмотра. Разбирать его нельзя. Особое внимание обратить на метод отсчета углов.

2. Включить осветитель. Фокусируя зрительную трубу, получить четкое изображение фотометрического поля. Затем, вращая винт фрикциона, т. е. поворачивая анализатор, следить за изменением яркости фотометрического поля в течение одного-двух полных оборотов. Объяснить наблюдаемые изменения. Измерить приближенно полутеневой угол поляризатора. Установить прибор на полутень и сделать нулевой отсчет  $n_0$  с точностью до  $\pm 0^\circ, 05$ .

3. Поместить в камеру поляриметрическую трубку с известным раствором. Вновь навести зрительную трубу на резкость. После этого повернуть с помощью фрикциона анализатор настолько, чтобы фотометрическое поле стало однородным (полутень!). Этим самым компенсируется действие сахарного раствора. Записать новый отсчет, пользуясь обоими нониусами. Если есть расхождение в их показаниях, то взять среднее арифметическое, учитывая при этом разницу в  $180^\circ$ .

4. Произвести таким же образом измерения со второй и третьей трубками. Результаты записать в таблицу 1.

5. Вычислить неизвестные концентрации растворов по известной, пользуясь формулой

$$\varphi = \pm [\alpha] c l$$

и памятуя о том, что в трубках находятся растворы сахара одного и того же сорта, т. е. что величина  $[\alpha]$  для всех трех растворов одинакова. Даны поляриметрических трубок указаны на них.

Таблица 1

№ трубок раствором сахарозы	Нулевой отсчет $n_0$	Отсчет с трубкой $n_i$	Угол поворота плоскости поляриза- ции $\varphi_i = n_i - n_0$	Концентрация $C_i = C_1 \frac{\varphi_i}{\varphi_1} = \frac{l_1}{l_i}$	Погрешность $\frac{\Delta C_i}{C_i} \cdot 100\%$
I (эталон)					
II					
III					

Напомним, что концентрацию  $C$  выражают в  $г/см^3$  или в  $г/100 см^3$ , а не в процентах.

Для определения весовой доли  $K$  в процентах нужно воспользоваться формулой  $K = \frac{c}{d} \cdot 100\%$ . Однако в этом случае требуется знать также удельные веса растворов  $d_i$ .

Результаты наблюдений и вычислений записываются в таблицу 1.

Оценку погрешности сделать с учетом следующих данных:

$$\Delta C_1 = 10^{-4} \frac{г}{см^3}; \quad \Delta l = \pm 0,1 \text{ мм.}$$

## Упражнение 2

### Определение концентрации раствора сахарозы с помощью сахариметра СУ-2

Выполняя это упражнение, следует обратить внимание на роль кварцевого компенсатора и особенности шкалы прибора. Она градуирована в международных сахарных градусах. При температуре  $20^\circ\text{C}$  поляриметрическая трубка длиной  $l_1 = 200$  мм, заполненная раствором, в  $100 см^3$  которого содержится 26 г чистой сахарозы, вращает плоскость поляризации света настолько, что сахариметр показывает  $\varphi_1 = 100^\circ\text{S} = 34,62$  круговых.

Если отвесить 26 г раствора сахарозы какой-либо другой концентрации  $C_2$  и разбавить эту навеску дистиллированной водой до  $100 см^3$ , то при той же температуре и той же длине трубки отчет  $\varphi_2$  в сахарных градусах по шкале сахариметра даст непосредственно весовую концентрацию  $K_2$  отвешенного раствора в процентах. Действительно, согласно (1)

$$\varphi_1 = [\alpha] C_1 l_1; \quad \varphi_2 = [\alpha] C_2 l_2, \quad (1')$$

$$\text{где } C_1 = \frac{26 \text{ г}}{100 \text{ см}^3}, \quad C_2 = \frac{P_2 \text{ г}}{100 \text{ см}^3}, \quad l_1 = l_2,$$

$P_2$  — вес сухой сахарозы, содержащейся в 26 граммах второго раствора.

Следовательно,  $\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{P_2}{26}$  и так как  $\varphi_1 = 100 \text{ S}$ , то  $\varphi_2 = \frac{P_2}{26} \cdot 100 \text{ S} = K_2 \%$ .

Приготовление навески и разведение ее дистиллированной водой связано с известными трудностями. Поэтому на практике обычно делают так: ненитруемым раствором сахарозы неизвестной концентрации наполняют поляриметрическую трубку, помещают ее в поляриметр и делают отчет  $\varphi_3$  по шкале сахариметра. Умножив результат этого отчета на 0,26 и разделив его на удельный вес раствора  $d_1$ , получают значение концентрации  $K_3$  в процентах. Студент сам может доказать правильность указанного расчета. Следует

только учесть, что температура опыта не должна сильно отличаться от 20°C.

### *Порядок выполнения упражнения 2*

1. Ознакомиться с прибором. Включить осветитель и сфокусировать зрительную трубу, а также лупу шкалы на резкость. Определить точность нулиуса и положение нуля. Головку винта кремальеры следует поворачивать без применения усилий. Нулевое деление шкалы должно совпадать с нулевым делением нулиуса при однородном полутеневом поле зрения. Шкала перемещается при вращении винта в сторону отрицательных значений только до  $-40^{\circ}\text{S}$ , а в сторону положительных — до  $+100^{\circ}\text{S}$ . Категорически запрещается применять усилия для большего перемещения шкалы.

2. Проверить показания прибора с помощью контрольной трубки. В штуцерах контрольной трубки имеются эталонные кварцевые пластины. Одна из них вращает плоскость поляризации вправо на  $100^{\circ}\text{S}$ , а другая — влево на  $-40^{\circ}\text{S}$ . Вкладывая в камеру прибора трубку с обеими пластинами, а затем поочередно с одной из них, проверяют контрольные точки  $+60^{\circ}\text{S}$ ,  $+100^{\circ}\text{S}$ ,  $-40^{\circ}\text{S}$ . По результатам проверки найти поправку  $\delta\varphi$ .

3. Определить концентрацию исследуемого раствора сахара. Получить у лаборанта поляризметрическую трубку длиной 200 мм и подлежащий исследованию раствор. Определить его удельный вес (с помощью пикнометра или весов Вестфали). Наполнить раствором поляризметрическую трубку. Делать это нужно очень внимательно. Отвинтив одну гайку и сняв покрывное стекло, нужно промыть трубку дистиллированной водой, затем ополоснуть испытуемым раствором.

После этого, держа трубку, закрытую снизу стеклом и гайкой, двумя пальцами за верхнюю часть, наполнить ее раствором настолько, чтобы мениск стал выпуклым, и выждать некоторое время, пока пузырьки воздуха, содержащиеся в жидкости, не поднимутся вверх (при этом нужно слегка постукивать пальцами по стенке трубки). Затем закрыть трубку покрывным стеклом, надвигая его на торец со стороны, как бы среза выступающую жидкость. При этом надо следить, чтобы под стеклом не образовался воздушный пузырек. Если с первого раза это не получается, то нужно повторить операцию, каждый раз доливая раствор. Когда трубка окажется закрытой правильно, закрепить покрывное стекло прижимной гайкой. Сильно туго прижимать покрывное стекло не следует, т. к. образующиеся в этом случае упругие напряжения в нем могут заметно искажать поле зрения.

4. Положить трубку с раствором в камеру прибора и сделать отчет  $\varphi$ . Вычислить величину  $K$ . Результаты измерений записать в таблицу 2.

Оценку погрешности следует сделать с учетом того, что длина трубки дается с точностью  $\Delta l = \pm 0,1$  мм.

№ раствора сахара, его температура	Удельный вес раствора, $d$ в $г/см^3$	Длина трубки, мм	Угол вращения, $\varphi$ , в $^{\circ}S$	Концентрация, $K = \frac{0,26}{d} \varphi \%$	Погрешность, $\varepsilon = \frac{\Delta K}{K} \cdot 100\%$

### Контрольные вопросы

1. Чем отличается компенсатор, примененный в приборе СУ-2, от описанного в теоретической части работы компенсатора Солейля? Сравните их устройства и действие на поле зрения.
2. Сделайте вывод закона Малюса.
3. Чем различаются между собой полутеневые поляризаторы, применяемые в поляриметре СМ и сахариметре СУ-2?
4. Как вы объясняете явление вращения плоскости поляризации света оптически активными веществами?

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, изд. «Наука», 1967, § 26, 30, 34.
2. Т. Н. Богданов и Е. Л. Субботина, Руководство к практическим занятиям по физике, ч. 2, изд. «Советская наука», 1950, стр. 232—244.
3. К. А. Путилов и В. А. Фабрикант. Курс физики, т. 3, Физматгиз, 1960, § 35, 36, 39.
4. Б. М. Яворский и А. А. Деглаф. Справочник по физике для инженеров, изд. «Наука», 1965, стр. 591—606.

## СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА И СВЕТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕМЕНТА С ЗАПИРАЮЩИМ СЛОЕМ

**Принадлежности:** фотоэлемент СЦВ-4, источник света, выпрямитель переменного тока (150 в), потенциометр, вольтметр, микроамперметр, оптическая скамья с масштабной линейкой, фотоэлемент с запирающим слоем (селеновый), гальванометр.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Фотоэффектом называется электрическое явление (изменение электропроводности, возникновение э. д. с. или эмиссия электронов), происходящее в веществе под действием электромагнитного излучения. Различают три вида фотоэффекта.

**Внешний фотоэффект** — эмиссия электронов из вещества (в вакуум или в другое вещество) под действием электромагнитного излучения. Его основные законы:

1) Количество эмитируемых электронов (фототок) пропорционально интенсивности излучения (закон Столетова).

2) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой излучения и не зависит от его интенсивности:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2} \quad (\text{уравнение Эйнштейна}),$$

где  $h\nu$  — энергия светового кванта, падающего на вещество,  $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$  эрг. сек,  $\nu$  — частота света,  $A$  — работа выхода электрона из вещества,  $\frac{mv_{\max}^2}{2}$  — кинетическая энергия электрона.

3) Для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная частота  $\nu_0$ , за которой фотоэффект не наблюдается. Если частота падающего света  $\nu_0$  такова, что  $h\nu_0 = A$ , то скорость вылетающих электронов равна нулю и фотоэффект отсутствует. Частоте света  $\nu_0$  соответствует длина волны  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$  ( $c$  — скорость света в вакууме), называемая длинноволновой (красной) границей фотоэффекта.

В настоящее время в науке и технике широкое применение получили фотоэлементы с внешним фотоэффектом — вакуумные или газонаполненные приборы, основанные на эмиссии электронов в вакуум под действием света.

В отличие от внешнего фотоэффекта, при **внутреннем фотоэффекте** электроны, сорванные квантами лучистой энергии с орбит атомов, остаются внутри вещества и увеличивают его электропроводность. Внутренний фотоэффект можно наблюдать в полупроводниках, например, в селене, где добавление свободных электронов заметно увеличивает проводимость. Из таких полупроводников изготавливают фотосопротивления.

Большой интерес представляет третий вид фотоэффекта — **фотоэффект запирающего слоя** (вентильный фотоэффект) — возникновение электродвижущей силы в системе, содержащей контакт двух разных полупроводников или полупроводника и металла, при поглощении квантов излучения оптического диапазона. С увеличением интенсивности излучения величина этой эдс возрастает, достигая насыщения при больших величинах. Механизм возникновения вентильного фотоэффекта на контакте электронного и дырочного полупроводников заключается в следующем.

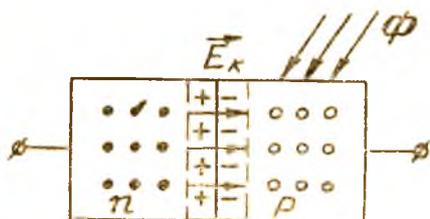


Рис. 1

При наличии контакта между электронным ( $n$ ) и дырочным ( $p$ ) полупроводниками (рис. 1) электроны из  $n$ -полупроводника диффундируют вследствие беспорядочного теплового движения в  $p$ -полупроводник и рекомбинируют с дырками. Дырки же из  $p$ -полупроводника диффундируют в  $n$ -полупроводник и рекомбини-

руют с электронами. В результате в  $n$ -полупроводнике вблизи контакта появляется пространственный положительный заряд, а в  $p$ -полупроводнике — отрицательный заряд, т. е. в тонком пограничном слое толщиной порядка  $10^{-6}$  см появляется контактное электрическое

поле  $E_k$ . Поле  $E_k$  противодействует диффузии электронов и дырок, но способствует обратному движению электронов из  $p$ -полупроводника в  $n$ -полупроводник и дырок из  $n$ -полупроводника в  $p$ -полупро-

водник. Так возникает состояние динамического (статического) равновесия между двумя токами: током, обусловленным контактной разностью потенциалов, и током, возникающим вследствие разности концентрации дырок и электронов в полупроводниках.

При освещении  $p$ -полупроводника светом в нем одновременно освобождаются электроны и дырки, образующие так называемые пары «электрон — дырка». Освобожденные светом носители тока перемещаются из области, где они созданы и имеются в повышенном количестве, к местам, где их мало. При подходе к  $p$ - $n$ -переходу

пары под действием контактного электрического поля  $E_c$  будут разделяться: дырки будут отбрасываться  $p$ - $n$ -переходом обратно в дырочный полупроводник, а электроны свободно пройдут в электронный полупроводник. Параллельно с возрастанием концентрации дырок в дырочном полупроводнике и электронов — в электронном возрастает создаваемое ими электрическое поле, которое препятствует переходу электронов из одного полупроводника через запирающий слой в другой полупроводник. Вместе с тем по мере возрастания этого поля возрастает и обратный поток электронов. В результате наступает динамическое равновесие, когда число электронов, перемещающихся за единицу времени через запирающий слой, сравнивается с числом электронов, перемещающихся за тот же промежуток времени в обратном направлении. В этот момент между электродами полупроводников устанавливается некоторая разность потенциалов  $E$ , которая и представляет собой фотоэлектродвижущую силу.

Если систему контактирующих полупроводников электронной и дырочной проводимости подключить к некоторой внешней нагрузке  $R_n$ , то переход электронов под действием света из  $p$ -полупроводника в  $n$ -полупроводник на границе их раздела вызовет в цепи нагрузки электрический ток постоянного направления.

Вентильный фотоэффект положен в основу устройства вентильных фотоэлементов. К полупроводниковым веществам, образующим системы, в которых может обнаруживаться вентильный фотоэффект, относятся: кремний, германий, селен и др. Кремниевые фотоэлементы, например, обладают высоким к. п. д. и могут служить в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую. В частности, кремниевые «солнечные батареи» нашли применение на искусственных спутниках Земли для питания радиоаппаратуры.

## Упражнение 1

### Получение вольтамперной характеристики вакуумного фотоэлемента

В этом упражнении будет использован вакуумный сурьмяноцезиевый фотоэлемент СЦВ-4. Он представляет собой стеклянный сферический баллон, в котором создается вакуум порядка  $10^{-6}$  —  $10^{-7}$  мм рт. ст. На одну половину внутренней поверхности баллона

нанесен тонкий слой сурьмы  $Sb$ , который затем покрывается тонким слоем цезия  $Cs$ . Образующееся при этом соединение  $Cs_2Sb$  и служит фотокатодом. Анодом служит металлический электрод, помещаемый в центре баллона. Световой поток  $\Phi$  (рис. 2), падающий на фотокатод  $K$ , вызывает фотоэлектронную эмиссию и, при положительном напряжении на аноде  $A$  относительно катода  $K$ , в вакуумном промежутке создается поток свободных электронов (фототок). Зависимость силы фототока в фотоэлементе от величины наложенного на него напряжения (при постоянном световом потоке на фотокатод) называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента.

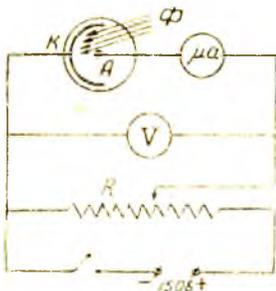


Рис. 2.

При постоянном напряжении величина фототока  $i$  пропорциональна потоку световой энергии  $\Phi$ , падающей на фотокатод:

$$i = \gamma \Phi, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — интегральная чувствительность фотоэлемента. Поток световой энергии выражается формулой

$$\Phi = \frac{I \cdot S}{r^2}, \quad (2)$$

где  $I$  — сила источника света в свечах (значение 1 см на установке),  $S$  — площадь фотокатода фотоэлемента (для СЦВ-4  $S = 11 \text{ см}^2$ ),  $r$  — расстояние от источника света до фотокатода. Из формул (1) и (2) получим:

$$\gamma = \frac{i \cdot r^2}{I \cdot S}. \quad (3)$$

#### Порядок выполнения упражнения

1. Установить фотоэлемент на оптической скамье на расстоянии  $r_1 = 25 \text{ см}$  от источника света и закрыть доступ света к нему.
2. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 2.

3. Установить нулевое напряжение на фотоэлементе. Открыть фотоэлемент. Повышая постепенно напряжение, отмечать через каждые 10 в величину фототока по микроамперметру. Напряжение повышать до получения ярко выраженного эффекта насыщения.

4. Получив ток насыщения, понижать напряжение, повторяя те же измерения, которые были выполнены в процессе повышения напряжения.

5. Повторить опыт, установив фотоэлемент на расстоянии  $r_2 = 30 \text{ см}$  от источника света.

Все результаты измерений записать в таблицу 1.

Таблица 1

$r_1$	$u$ (в)	$i_1$ (μa)	$i_2$ (μa)	$i_{cp}$	$r_2$	$u$ (в)	$i_1$ (μa)	$i_2$ (μa)	$i_{cp}$

6. По результатам измерений построить графики зависимости фототока от величины напряжения, наложенного на фотоэлемент, для обоих значений  $r$ .

7. Вычислить интегральную чувствительность  $\gamma$  фотоэлемента по формуле (3) для двух положений лампочки и среднее ее значение.

### Упражнение 2

#### Снятие световой характеристики фотоэлемента с запирающим слоем

В предлагаемом упражнении исследуется селеновый фотоэлемент с запирающим слоем. Он состоит из опорной железной пластинки 1 (рис. 3), на которую нанесен тонкий слой кристаллического селена 2, имеющего дырочную проводимость. На селен путем катодного распыления наносится полупрозрачный слой металла 4 (золото или другой металл), атомы которого диффундируют в селен и превращают тонкий слой его вблизи поверхности металлической пленки в  $n$ -полупроводник. Таким образом, под пленкой металла в селене возникает запирающий слой 3, обладающий преимущественной проводимостью электронов от селена к металлической пленке. Внут-

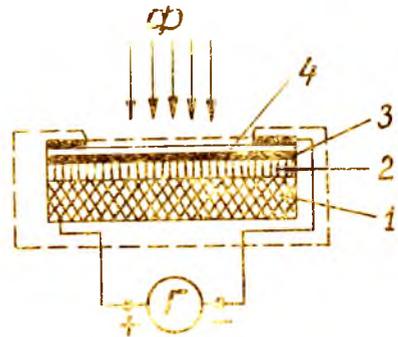


Рис. 3

реннее сопротивление селенового фотоэлемента в направлении железо—селен—металлическая пленка обычно составляет несколько сотен ом, а в обратном направлении — в 10—20 раз больше.

Под влиянием лучистой энергии, падающей на поверхность селенового фотоэлемента, свободные электроны переходят из селена сквозь запирающий слой в металлическую пленку; последняя заряжается отрицательно, а селен—положительно: между электродами

селенового фотоэлемента создается разность потенциалов. Если селеновый фотоэлемент замкнуть на внешнюю цепь, то в ней без воздействия какой-либо внешней э. д. с. возникает электрический ток  $i$ , который оказывается пропорциональным действующему световому потоку  $\Phi$ , т. е.

$$i = \gamma \Phi, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — интегральная чувствительность фотоэлемента. Поток световой энергии  $\Phi$  можно выразить через освещенность  $E$  рабочей поверхности  $S$  фотоэлемента:

$$\Phi = E \cdot S.$$

Следовательно,  $i \sim E$ . Зависимость фототока  $i$  от освещенности  $E$  фотоэлемента называется световой характеристикой фотоэлемента. При нормальном падении света от источника силой  $I$  освещенность  $E$  рабочей поверхности фотоэлемента можно выразить формулой

$$E = \frac{I}{r^2},$$

где  $r$  — расстояние от источника света до фотоэлемента.

#### Порядок выполнения упражнения

1. Подключить гальванометр к клеммам фотоэлемента с запирающим слоем.
2. Установить фотоэлемент на оптической скамье на расстоянии 80 см от источника света и снять предохранительную крышку с него.
3. Определить показание гальванометра при выключенном источнике света ( $\alpha_0$ ).
4. Включить источник света и определить показание гальванометра. Затем уменьшить расстояние между лампочкой и фотоэлементом на 5 см и снова произвести отсчет по гальванометру. Аналогичным образом, изменяя расстояние между фотоэлементом и лампочкой, сделать не менее семи измерений. Перед каждым новым

Таблица 2

№ п.п.	Расстояние $r$ (м)	Нулевое показание $\alpha_0$	Показания гальванометра при включенном источнике света		Освещенность $E = \frac{I}{r^2}$ , лк
			без поправки $\alpha$	с поправкой $\alpha - \alpha_0$	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

измерением проверить показания гальванометра при выключенном источнике света.

5. Результаты измерений занести в таблицу 2 и произвести указанные в ней вычисления.

6. Построить график зависимости величины фототока от освещенности фотоэлемента.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление фотоэффекта?
2. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
3. Объясните принцип действия фотоэлементов с внешним фотоэффектом.
4. В чем сущность фотоэффекта запирающего слоя?
5. Как работает вакуумный фотоэлемент?

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1967, § 56.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева. Курс общей физики, т. 3, Физматгиз, 1962, § 333, 334, 336.
3. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Госгехиздат, 1952, § 167—173.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НИКЕЛЕВОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИ ПОМОЩИ ПИРОМЕТРА

**Принадлежности:** пирометр ОППИР-09, аккумулятор, авто-трансформатор, трансформатор, никелевая пластинка.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для измерения высоких температур обычно используются методы оптической пирометрии, основанные на измерении интенсивности излучения или поглощения исследуемого тела в ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной областях спектра.

Методы оптической пирометрии не требуют непосредственного контакта измерительной аппаратуры с исследуемым телом. Благодаря этому они позволяют, во-первых, без какого-либо ущерба для аппаратуры измерять очень высокие температуры, во-вторых, измерять температуры весьма удаленных тел и, наконец, их применение не вызывает искажений состояния исследуемого объекта.

Для измерения температур твердых и жидких тел, излучающих сплошной спектр, в оптической пирометрии используются следующие методы: метод суммарной радиации, цветовой и яркостный. Определение температур этими методами обычно проводится с помощью приборов, называемых оптическими пирометрами.

Метод суммарной радиации основан на измерении суммарной яркости тела  $B(T)$  для всех длин волн с помощью пирометра суммарной радиации. Пирометр градуируется обычно по черному телу, и тогда он непосредственно показывает радиационную температуру  $T_r$  исследуемого тела. Истинная температура тела  $T$  в соответствии с законом Стефана-Больцмана связана с  $T_r$  соотношением:

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{\epsilon(T)}} \cdot T_r, \quad (1)$$

где  $\alpha(T)$  — суммарный коэффициент поглощения тела. Для всех тел, кроме черного,  $\alpha(T) < 1$ ; поэтому всегда  $T_1 < T$  и равна  $T$  только для черного тела.

Цветовой метод основан на измерении распределения интенсивности в спектре излучения исследуемого тела. В одном из вариантов цветового метода измеряют отношение интенсивностей излучения при двух длинах волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и соответствующие коэффициенты поглощения  $\alpha(\lambda_1, T)$  и  $\alpha(\lambda_2, T)$ . Затем определяют  $T$  тела по следующей формуле:

$$B(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \left[ \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $C_1 = 2\pi^5 h c^2 = 3,75 \cdot 10^{-16}$  эрг. см<sup>2</sup>. сек<sup>-1</sup> и  $C_2 = \frac{hc}{K} = 1,438$  см. град — первая и вторая константы излучения ( $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $K$  — постоянная Больцмана). Эта формула получена из закона Кирхгофа и формулы Планка.

В другом варианте с помощью цветового пирометра, проградуированного по черному телу, измеряют цветовую температуру  $T_c$  тела, связанную с его истинной температурой  $T$  соотношением:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \ln \frac{\alpha(\lambda_1, T)}{\alpha(\lambda_2, T)} \cdot \left[ C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Это соотношение также получается на основании формулы Планка.  $T_c$  серых тел, для которых  $\alpha(\lambda, T)$  не зависит от длины волны, совпадает с истинной температурой  $T$ ; поэтому цветовой метод выгодно применять при пирометрии тел, близких по свойствам к серым. В этом случае можно избежать измерений  $\alpha(\lambda, T)$ , часто затруднительных.

Яркостный метод основан на измерении спектральной энергетической яркости  $B(\lambda, T)$  и спектрального коэффициента поглощения  $\alpha(\lambda, T)$  испытуемого тела с последующим применением формулы (2). Но чаще применяется другой вариант яркостного метода: яркостным пирометром, проградуированным по черному телу, измеряют яркостную температуру  $T_n$  испытуемого тела, связанную с истинной  $T$  соотношением:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_n} = \frac{\lambda}{C_2} \ln [\alpha(\lambda, T)]. \quad (4)$$

Для черного тела  $\alpha(\lambda, T) = 1$ ,  $T_n = T$ ; для остальных тел всегда  $T_n < T$ .

Выведем формулу (4). Яркость черного тела при температуре  $T$  по закону Вина (упрощенной формуле Планка) равна:

$$B_0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp \left( - \frac{C_2}{\lambda T} \right).$$

Яркость черного тела, равная наблюдаемой яркости испытуемого тела, равна:

$$B(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp \left( - \frac{C_2}{\lambda T_n} \right),$$

Их отношение:

$$\frac{B}{B_0} = z(\lambda, T) = \exp \left[ \frac{C_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right],$$

откуда

$$\ln [z(\lambda, T)] = \frac{C_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

или

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} = \frac{\lambda}{C_2} \ln [z(\lambda, T)].$$

В данной работе предлагается измерить температуру накаленной никелевой пластинки яркостным методом.

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Основную часть оптического пирометра составляет зрительная труба с объективом  $L_1$  и окуляром  $L_2$  (рис. 1).

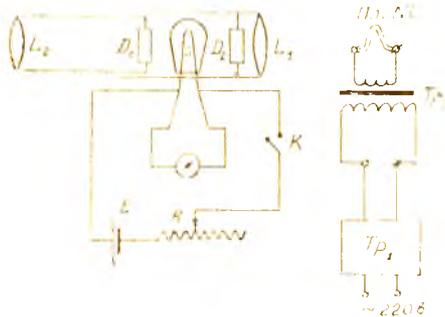


Рис. 1

Труба фокусируется на раскаленную пластинку из никеля, изображение которой должно располагаться в той же плоскости, в которой находится нить пирометрической лампочки накаливания, питаемой током от аккумулятора  $E$ . Сила тока регулируется реостатом  $R$ , смонтированным в самом приборе.

Показывающий прибор проградуирован в градусах температуры черного тела, имеющего ту же яркость, что и нить лампочки при данной силе тока.  $D_1$  — красный светофильтр, выделяющий узкий участок спектра (в области длины волны  $\lambda_{\text{н}} = 665 \cdot 10^{-7}$  см).  $D_2$  — дымчатый светофильтр, который ослабляет яркость изображения накаленного тела. При введении светофильтра  $D_2$  отсчет ведется по шкале 1200—2000°C, а без него — по шкале 800—1400°C. Использование дымчатого светофильтра дает возможность измерять высокие температуры (свыше 1400°C), не перекаливая нити пирометрической лампочки.

Пирометр включается в цепь аккумулятора с помощью ключа  $K$ . Пластика из никеля накаливается переменным током от понижающего трансформатора  $T_{p2}$  (рис. 1). Сила тока, накаливающего никелевую пластинку, регулируется автотрансформатором  $T_{p1}$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подсоединить аккумулятор к пирометру, предварительно проверив, полностью ли введен реостат пирометра (контрольная нулевая отметка на кольце реостата должна совпадать с нулевой отметкой на крышке корпуса).

2. Собрать схему накала никелевой пластинки (рис. 1) и дать ей темно-красный накал.

3. Поставить зрительную трубу пирометра на накаленную пластинку и, перемещая объектив, добиться полной резкости изображения пластинки, на фоне которой вырисовывается темная нить пирометра.

4. Глядя в трубу на нить лампочки и постепенно вводя реостат пирометра, дать нити накал, при котором ее изображение становится незаметным на фоне светящейся никелевой пластинки. Фиксировать положение реостата, при котором нить перестает быть заметной, довольно трудно. Поэтому рекомендуется фиксировать два положения реостата, записывая показания прибора в таблицу: одно положение, при котором нить кажется немного светлее пластинки, и другое, при котором нить кажется немного темнее пластинки. Измерения произвести не менее трех раз. Найти среднее значение яркостной температуры  $T_b$ .

5. Увеличить немного накал пластинки (при этом не следует доводить ее до очень яркого красного свечения) и повторить измерения при новом накале пластинки.

6. Все результаты измерений записать в таблицу.

Напряжение на никелевой пластинке в вольтах	Яркостная температура по пирометру в градусах по шкале Цельсия				Среднее значение яркостной температуры по шкале Кельвина, $T_b = t_{cp} + 273^\circ$	Истинная температура пластинки в градусах шкалы Кельвина
	накал нити меньше накала пластинки		накал нити больше накала пластинки			
$U_1 =$	1 2 3		1 2 3		$T_{b1} =$	$T_1 =$
$U_2 =$	1 2 3		1 2 3		$T_{b2} =$	$T_2 =$

7. Пользуясь формулой (4), вычислить истинную температуру пластинки  $T$ .

Примечание.  $\lambda_{кр} = 665 \cdot 10^{-7}$  см;  $\alpha(\lambda, T) = 0,85$ ;  
 $\ln [\alpha(\lambda, T)] = -0,1625$ .

## Контрольные вопросы

1. Перечислите известные вам методы определения температуры.
2. В чем преимущество методов оптической пирометрии?
3. В чем состоит метод суммарной радиация?
4. Выведите соотношение между радиационной и истинной температурой, пользуясь законом Стефана-Больцмана.
5. Выведите соотношение между истинной и цветовой температурой тела.
6. Выведите соотношение между истинной и яркостной температурой тела.
7. Объясните принцип действия оптического пирометра ОППИР-69.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Кортнев, Ю. В. Рублев, А. Н. Куценко. Практикум по физике, М., изд. «Высшая школа», 1963, работа 78.
2. Физический практикум, под редакцией В. Н. Ивероновой. Физматгиз, 1962, задача 134.
3. Г. С. Ландсберг. Оптика. Гостехиздат, 1952, § 186—194.
4. Г. А. Зисман и О. М. Тодес. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1965, § 30—34.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН СВЕТОВЫХ ВОЛН МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

**Принадлежности:** универсальный монохроматор УМ-2, ртутная лампа, линза  $F = 110$  см, гелиевая трубка, блок питания.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В шкале электромагнитных волн световые волны, воспринимаемые человеческим глазом, занимают спектральный интервал  $7,6 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5}$  см.

Как спектры испускания, так и спектры поглощения, в зависимости от способа возбуждения бывают линейчатыми (атомные), полосатыми (молекулярные) или сплошными.

Сплошные спектры дают раскаленные твердые и жидкие тела, а также светящиеся газы или пары, если они находятся под высоким давлением.

Линейчатые и полосатые спектры характерны для свечения газов или паров малой плотности.

Природа линейчатых спектров может быть объяснена следующим образом. Электроны атома совершают вращательное движение по вполне определенным (стационарным) орбитам вокруг ядра. Чем больше радиус орбиты электрона, тем большей энергией обладает атом.

При поглощении кванта энергии электрон атома переходит на одну из орбит большего радиуса. Когда электрон возвращается на более близкую к ядру орбиту, атом излучает квант энергии. Так как атом имеет строго определенные стационарные орбиты, то он поглощает и излучает вполне определенные кванты энергии, характерные только для данного элемента и данной орбиты.

В случае линейчатого спектра мощность излучения имеет относительно большую величину в очень узких пределах вблизи некоторых определенных длин волны, а для всех прочих длин волн близка к нулю.

Линейчатый спектр испускания представляет собой визуально ряд тонких линий различного цвета. Частота излучения, соответствующая каждой линии, подчиняется уравнению

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n,$$

где  $h$  — постоянная Планка;

$\nu_{mn}$  — частота излучения;

$E_m$  и  $E_n$  — энергии электрона, соответствующие квантовым числам  $m$  и  $n$ .

По расположению линий в спектре можно судить о веществе источника излучения (или, в случае спектра поглощения, — поглощающей среды). На этом принципе основан один из важнейших методов исследования вещества — спектральный анализ.

Если пропускать излучение от нагретого твердого тела через пары, то на фоне непрерывного спектра появятся темные линии в тех местах, которые соответствуют линиям спектра испускания данного пара (закон Кирхгофа). Так называемые линии Фраунгофера в солнечном спектре являются линиями спектра поглощения, возникающими в результате прохождения лучей солнца через хромосферу Солнца и атмосферу Земли.

#### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Для проведения спектрального анализа в данной работе используется монохроматор УМ-2. Монохроматор представляет собой спектральный прибор, выделяющий очень узкие участки спектра. Он может быть использован для различных спектральных исследований, в частности, для измерения интенсивностей спектральных линий и для проведения абсорбционного анализа.

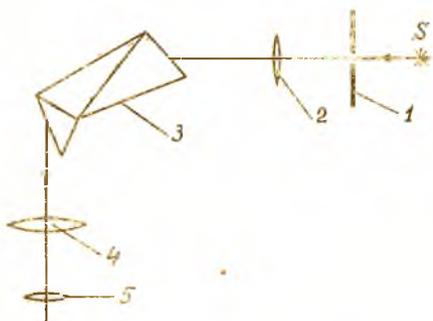


Рис. 1

Монохроматор состоит из входной щели 1 (рис. 1) и объектива 2, образующих коллиматор, из которого выходит параллельный пучок лучей, падающий затем на дисперсионную призму Аббе постоянного отклонения 3.

Лучи света, пройдя дисперсионную призму, попадают в объектив 4 выходной трубы монохроматора, который собирает их в фокальной плоскости окуляра 5 зрительной трубы. В фокальной плоскости

объектива зрительной трубы имеется указатель.

Ширину входной щели можно изменять от 0 до 4 мм, вращая барабашчик, на котором имеется шкала с ценой деления, равной 0,01 мм.

Призма постоянного отклонения установлена на столике, который соединен с поворотным механизмом, связанным с измерительным барабаном.

На измерительном барабане поворотного механизма даны относительные деления-градусы поворота самого барабана. Отсчет читается против индекса, скользящего по спиральной канавке барабана.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Построить градуировочный график по спектру паров ртути, а затем по нему определить длины воли спектра гелия.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 1. Построение градуировочного графика

1. Выбрать ширину щели коллиматора так, чтобы интенсивность линий была достаточна для их визуального наблюдения.

2. Определить цену деления на шкале барабана и научиться делать отсчеты быстро и без ошибок.

3. Включить ртутную лампу (не более, чем на 5—7 минут; включенные лампы следует производить только под наблюдением лаборанта). При помощи линзы направить свет от лампы на щель коллиматора и сфокусировать изображение светящегося столба лампы.

4. В зрительную трубу прибора рассмотреть спектр. Вращением барабана добиться совпадения стрелки указателя последовательно с теми линиями спектра, для которых приведены длины воли на рис. 2 и в таблице наблюдений.

6907	6234	5790	5461	5025	4916	4358	4072	
6716	6073	5791					4046	

Рис. 2

Положение каждой линии определяется по показаниям на шкале барабана и записывается в таблицу наблюдений.

5. Согласно таблице длин воли линий паров ртути, построить градуировочный график. Для этого, выбрав удобные масштабы, отложить по оси абсцисс угловые расстояния линий, а по оси ординат — соответствующие им длины воли. За начало координат при этом можно взять  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$  и соответствующий этой длине волны угол.

## II. Измерение длины волны в спектре гелия

1. Подключить трубку с гелием к источнику напряжения.
2. Получить на щели коллиматора четкое изображение яркой части трубки.
3. Просмотреть весь спектр, а затем все линии последовательно помещать над стрелкой указателя и делать отсчеты по барабану.
4. По градуировочному графику определить длины волны в спектре гелия.

Таблица наблюдений

Вещество	Цвет линий	Соответствующий поворот барабана монохроматора	Длина волны, $\text{Å}$
а) Ртуть	1. Темно-красная яркая		6907
	2. Темно-красная слабая		6746
	3. Красная яркая		6274
	4. Красная слабая		6073
	5. Интенсивный желтый дублет		5791
			5790
	6. Зеленая яркая		5461
	7. Сине-зеленая слабая		5025
	8. Голубая яркая		4916
	9. Темно-синяя яркая		4358
	10. Фиолетовая яркая		4077
11. Фиолетовая яркая		4046	
б) Гелий			

### Контрольные вопросы

1. Начертить оптическую схему монохроматора УМ-2 и объяснить принцип его действия.
2. Какими свойствами отличается видимый участок спектра электромагнитного излучения от других его частей?
3. Перечислите методы спектрального анализа веществ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Зисман и О. М. Тодес. Курс физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1968, § 50—52.
2. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Гостехиздат, 1957, § 198.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА

Принадлежности: горизонтальный фотометр типа ФМС-56 с осветителем, набор кювет, исследуемые растворы.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

#### 1. Поглощение света

Прохождение света через вещество сопровождается его поглощением, т. е. расходом энергии излучения на возбуждение колебаний электронов. Частично эта энергия вновь возвращается излучению в виде вторичных волн, посылаемых электронами, частично же она переходит в другие формы энергии, например, в энергию теплового движения.

Пусть через однородное вещество распространяется пучок параллельных монохроматических лучей с длиной волны  $\lambda$ . Разобьем проходимый светом слой вещества на ряд элементарных слоев толщиной  $dl$  (рис. 1).

При прохождении света сквозь такой элементарный слой его интенсивность  $I_\lambda$  убывает на величину:

$$-dI_\lambda = kI_\lambda \cdot dl. \quad (1)$$

Интегрируя уравнение (1) в пределах от 0 до  $l$ , получаем:

$$I_\lambda = I_0 \cdot e^{-k \cdot l}. \quad (2)$$

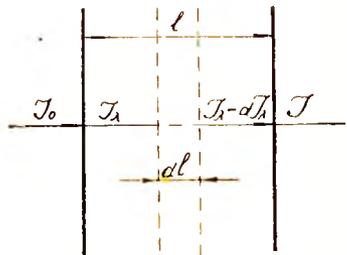


Рис. 1

Здесь  $I_x$  — интенсивность света, выходящего из слоя поглощающего вещества,  $I_0$  — интенсивность света, входящего в него,  $k$  — коэффициент поглощения. Он зависит от свойств поглощающего вещества и длины волны. Зависимость  $k$  от длины волны называется спектром поглощения. Закон (2) называется законом Бугера.

Зависимость коэффициента поглощения от длины волны имеет иногда сложный характер: в спектре существуют довольно узкие области сильного поглощения (большие значения  $k$ ), в то время как в других частях спектра заметного ослабления света нет (селективное поглощение). Особенно замечательно поглощение, обнаруживаемое парами большинства металлов при невысоком давлении, представляющими собой собрание атомов, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Коэффициент поглощения таких паров почти для всех длин волн очень мал (близок к нулю) и лишь для очень узких спектральных областей, шириной в несколько сотых ангстрема, обнаруживает резкие максимумы. Так,

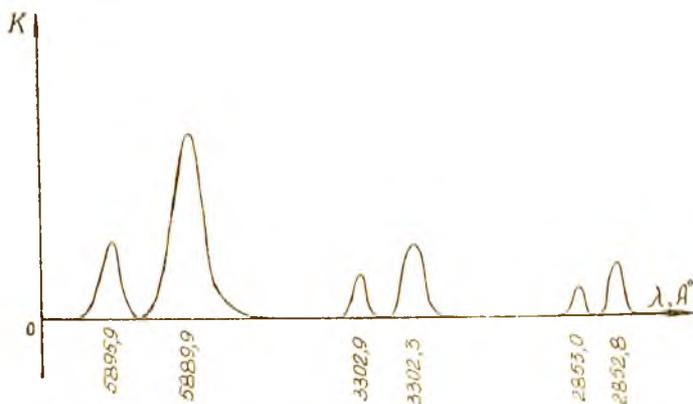


Рис. 2

для паров натрия зависимость коэффициента поглощения от длины волны может быть изображена кривой, приведенной на рис. 2. Указанные области сильного поглощения соответствуют собственным частотам колебаний электронов внутри атомов.

Спектры поглощения твердых тел и жидкостей (включая и растворы красок) дают широкие полосы поглощения (плавный ход коэффициента  $k$ ).

Если поглотителем является растворенное в жидком или твердом растворителе вещество, то поглощение будет тем больше, чем больше молекул поглощающего вещества свет встречает на своем пути. Поэтому в случае слабых растворов, т. е. когда взаимодействие молекул растворенного вещества мало, коэффициент поглощения оказывается пропорциональным концентрации раствора  $C$ :

$$k = A \cdot C, \quad (3)$$

где  $A$  — новый коэффициент, не зависящий от концентрации и характерный для молекул поглощающего вещества. В этом случае закон Бугера приобретает вид:

$$I_x = I_0 e^{-ACl}, \quad (4)$$

Закон Бугера (4) является весьма полезным для определения концентрации поглощающего вещества путем фотометрических измерений, которые можно выполнять с большой степенью точности. Этим приемом часто пользуются в лабораторной и промышленной практике для быстрого определения концентрации растворов, химический анализ которых оказывается очень сложным.

Поглощение связано также с дисперсией света, т. е. зависит от показателя преломления среды. Это объясняется тем, что и поглощение, и дисперсия обуславливаются одним и тем же процессом взаимодействия световых волн с веществом.

Обычно в теоретических расчетах пользуются величиной  $\chi$ , связанной с коэффициентом поглощения соотношением:

$$\chi = k \frac{\lambda}{4\pi},$$

где  $\lambda$  — длина волны в веществе. Так как длина волны в вакууме  $\lambda_0 = n\lambda$ , то

$$k = \frac{4\pi}{\lambda_0} n\chi.$$

Величина  $n\chi$  называется показателем поглощения. Как показатель преломления, так и показатель поглощения оказываются зависящими от соотношения между частотой световой волны  $\omega$  и собственной частотой колебаний электронов в атоме  $\omega_0$ . Если эту зависимость изобразить графически, то получается следующая картина (рис. 3). Сплошной кривой изображена зависимость показателя преломления от частоты света (дисперсионная кривая).

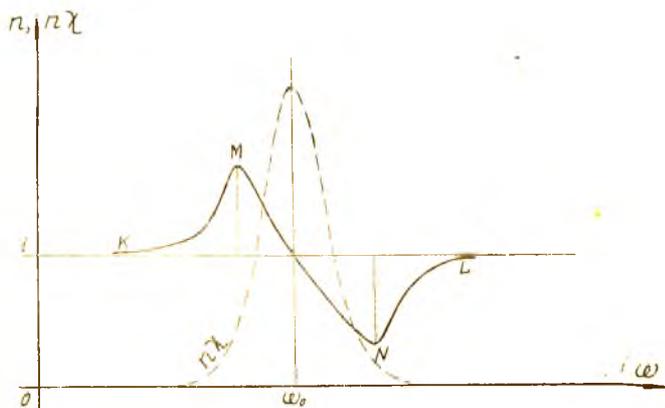


Рис. 3.

Как видно из рисунка, в областях  $KM$  и  $NL$  показатель преломления возрастает с увеличением частоты (т. е. с уменьшением длины волны). Такая зависимость показателя преломления от частоты называется нормальной дисперсией. В области  $MV$  показатель преломления, наоборот, уменьшается с увеличением частоты. Это так называемая аномальная дисперсия.

Пунктирная кривая изображает зависимость показателя поглощения от частоты света. Из нее видно, что наибольшее поглощение имеет место тогда, когда частота падающего на вещество света  $\omega$  близка к собственной частоте колебаний электронов в атомах вещества  $\omega_0$ . Область наибольшего поглощения совпадает с областью аномальной дисперсии.

В данной работе исследуется зависимость коэффициента поглощения от длины волны падающего света для растворов красителей. Кривые, изображающие такую зависимость, называются кривыми поглощения. непосредственно измеряемой величиной является пропускимость раствора  $T$  и оптическая плотность  $D$ . Пропускимостью называется величина, выражаемая отношением интенсивности света, прошедшего через раствор, к интенсивности света, входящего в раствор:

$$T = \frac{I_t}{I_0}.$$

Согласно закону Бугера (2), пропускимость связана с коэффициентом поглощения соотношением:

$$T = \frac{I_t}{I_0} = e^{-kl}.$$

Так как коэффициент поглощения зависит от длины волны, то и пропускимость будет функцией длины волны. Закон Бугера в настоящее время пишут так:

$$\frac{I_t}{I_0} = 10^{-k'l},$$

где  $k' = klge = 0,43 k$ .

Отрицательный логарифм пропускимости называется оптической плотностью вещества и обозначается  $D$ .

$$D = -\lg T,$$

или

$$D = -\lg \frac{I_t}{I_0} = k'l = 0,43 kl.$$

Оптическая плотность характеризует поглощение вещества и также является функцией длины волны.

### III. Описание прибора

Измерения выполняются с помощью горизонтального фотометра типа ФМС-56. Оптическая схема фотометра и осветителя изображена на рис. 4: 1 — лампа с прямой нитью; 2 — зеркала осветителя;

3 — два конденсора; 4 — матовые стекла; 5 — столики для кювет с растворами; 6 — диафрагмы с изменяемым отверстием; 7 — объективы; 8 — стеклянные ромбические призмы; 9 — бипризма; 10 — светофильтр; 11 — окуляр, сфокусированный на грань бипризмы.

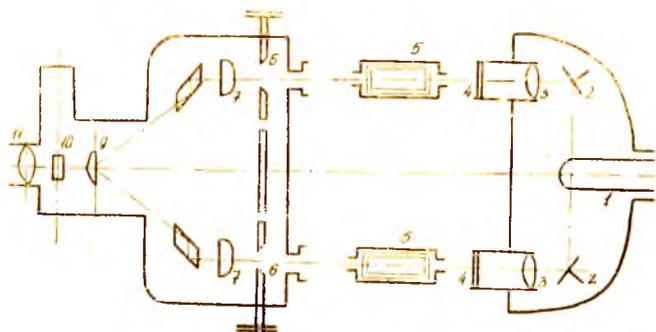


Рис. 4

Два пучка света, выходящих из осветителя, проходят через регулируемые диафрагмы и объединяются с помощью оптических призм 8 и 9. Наблюдатель видит в окуляр два поля зрения с резкой границей раздела (грань бипризмы).

Левое поле зрения освещено световым пучком, прошедшим через правое окно фотометра, а правое поле зрения — пучком, прошедшим через левое окно. Изменяя отверстие каждой диафрагмы, т. е. сечение соответствующего пучка, можно изменять яркость любой половины поля зрения. Это позволяет производить фотометрическое сравнение интенсивности обоих световых пучков.

Если один из пучков имеет меньшую интенсивность, чем второй, например, за счет поглощения в стоящей на его пути кювете с раствором, то, уменьшая отверстие диафрагмы на пути второго пучка, можно уравнивать яркость обоих полей. По величине изменения отверстия диафрагмы можно определить относительную интенсивность обоих световых пучков. Сменные фильтры, помещенные перед окуляром, позволяют производить эти измерения в различных спектральных участках. Конструкция раздвижной диафрагмы изображена на рис. 5.

Полное открытие диафрагмы происходит за один оборот барабана. Диафрагма полностью открыта, когда две ее половины не накладываются друг на друга, а лишь соприкасаются, образуя квадратное отверстие. Интенсивность света, прохо-

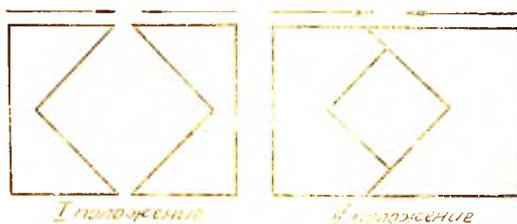


Рис. 5

дящего через диафрагму, пропорциональна площади отверстия. Отверстие диафрагмы изменяется вращением барабана. Черная шкала барабана проградуирована так, что ее показания пропорциональны интенсивности проходящего света.

Если при измерении поглощения раствор помещен в одном пучке, диафрагма которого стоит на делении 100, и поворотом второго барабана уравнены яркости обеих полей, то отчет по черной шкале дает непосредственно пропускаемость раствора  $T$ , выраженную в процентах. Отчет по красной шкале дает оптическую плотность раствора  $D$ .

Для получения спектральной кривой пропускания или оптической плотности используются фильтры, укрепленные в револьверной диафрагме. Область пропускания этих фильтров довольно узка (см. таблицу 1), так что при исследовании растворов со сравнительно широкими и плавными полосами поглощения можно пользоваться эффективной длиной волны, которая указывается в таблице.

Для получения достаточно точных результатов необходимо обеспечить одинаковую начальную яркость обеих полей. Это достигается тщательной настройкой прибора. В нашем приборе соответствующая установка уже сделана. При фотометрировании критерием равенства яркости полей является исчезновение границы раздела полей. Во время фотометрирования глаз наблюдателя должен быть прижат к наглазнику окуляра и по возможности всегда принимать при измерениях одно и то же положение. Лицам, носящим очки, рекомендуется при фотометрировании их снимать.

Таблица 1

№ п.п.	Маркировка	Эффективная длина волны в Å	Примерная ширина области пропускания в Å
1	М-72	7260	650
2	М-66	6650	650
3	М-61	6190	400
4	М-57	5740	350
5	М-53	5350	350
6	М-50	4960	400
7	М-47	4650	450
8	М-43	4320	550
9	К-2	6330	850
10	К-4	5500	500

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Тщательно промытую и сполоснутую дистиллированной водой кювету наполняют исследуемым раствором и помещают на столик фотометра. Во втором пучке для компенсации потерь на отражение света ставят вторую такую же кювету, наполненную дистиллиро-

вашей водой. С помощью откидной лупы у окуляра получают резкое изображение квадратного выреза диафрагмы и проверяют полное и равномерное заполнение действующих отверстий кювет светом.

Устанавливают барабан диафрагмы в световом плече, где стоит кювета с раствором, на деление 100. Введя в поле зрения первый светофильтр, производят вращением второго барабана уравнение яркости обеих полей. При измерениях одновременно отсчитывают  $T$  и  $D$ . Вводят в поле зрения последовательно все фильтры и производят измерения. Если яркость полей при работе со светлыми фильтрами очень велика, то устанавливают барабан плеча с раствором не на деление 100, а на деление 50, введя соответствующие изменения в отчет по второму барабану. Данные измерений заносят в таблицу 2. Сделав отсчеты при первом расположении кювет, меняют их местами и производят все измерения. Из обеих серий измерений находят окончательный результат для каждой длины волны.

Если через  $T'$  обозначить пропускимость, определенную при первом положении кювет, а через  $T''$  — при втором положении кювет, то окончательный результат найдется из выражения.

$$T = \sqrt{T' \cdot T''}.$$

При вычислении оптической плотности окончательный результат будет

$$D = \frac{D' + D''}{2},$$

где  $D'$  — оптическая плотность в первой серии измерений,

$D''$  — оптическая плотность во второй серии измерений.

Результаты измерений наносят на два графика, откладывая по оси абсцисс эффективную длину волны, а по оси ординат соответственно величины  $T$  и  $D$ .

Аналогичным образом производят определение  $T$  и  $D$  для другого раствора.

Таблица 2

Раствор \_\_\_\_\_

Концентрация \_\_\_\_\_

№ фильтра	Эффект. длина волны	Кюветы в первом положении		Кюветы во втором положении		Среднее из двух измерений	
		$T'$	$D'$	$T''$	$D''$	$\sqrt{T' \cdot T''}$	$\frac{D' + D''}{2}$

## Контрольные вопросы

1. Выведите закон Бугера. Какой физический смысл имеет знак минус в этом законе?
2. Как объясняется поглощение света средою с точки зрения электромагнитной теории света?
3. Почему коэффициент поглощения света зависит от длины волны?
4. Какие соответствующие изменения в отсчете по второму барабану надо внести, если барабан плеча с раствором устанавливают не на делении 100, а на делении 50?

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Кортнев и др. Практикум по физике, М., изд. «Высшая школа», 1963, стр. 406—411.
  2. Г. С. Ландсберг. Оптика, т. III, М., Гостехиздат, 1952, § 148—150.
-

## ПОЛУКОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СПЛАВОВ НА АЛЮМИНИЕВОЙ ОСНОВЕ

Принадлежности: стилоскоп СЛП-1, образцы.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Основной принцип проведения спектрального анализа состоит в следующем: вещество заставляют светиться, например, вводя его в зону электрического разряда (дуги, искры) или в пламя. Излучение рассматривается или фотографируется с помощью спектрального аппарата. Наблюдаемый спектр, как правило, содержит основные линии всех входящих в состав пробы компонентов. По наличию линий того или иного элемента и по их интенсивности можно судить о его присутствии в пробе и его концентрации, т. е. можно вести качественный и количественный анализ.

**Качественный спектральный анализ** может проводиться с двойной целью: обнаружить в пробе все ее составные части или только один определенный элемент. В обоих случаях приходится рассматривать полный спектр излучения. Присутствие в спектре линий данного элемента указывает на наличие его в анализируемом веществе.

Если учесть, что дуговые и искровые спектры металлов содержат по нескольку сотен и даже тысяч спектральных линий, то можно опасаться, что при сложном составе пробы, т. е. при наложении большего числа многолинейчатых спектров окажется невозможным в них разобраться.

Однако это не так. С уменьшением количества данного элемента в пробе видимый спектр его упрощается: более слабые спектральные линии становятся на общем фоне незаметными, и при

малых процентных содержаниях наблюдаются только 4—5 наиболее интенсивные линии. Эти линии называются «последними», т. к. они исчезают в спектре при уменьшении концентрации последними.

К числу последних линий принадлежат, например, желтые линии натрия, которые еще заметны при его концентрациях в пробе порядка  $10^{-5}$  %. В настоящее время имеются таблицы спектров и таблицы последних линий для всех элементов.

Таким образом, при исследовании пробы на наличие в ней искомого элемента нет надобности рассматривать спектр по всей его длине и отыскивать все линии данного элемента. Достаточно найти 3—4 последние линии, местонахождение которых точно известно. Проведение качественного спектрального анализа облегчается этим во много раз.

**Количественный спектральный анализ.** Наблюдая спектр вещества, можно установить состав последнего по присутствию определенных спектральных линий. Кроме того, по яркости спектральных линий можно оценить количественное содержание интересующих примесей в исследуемом веществе. Чем больше содержание примеси в испытуемом образце, тем интенсивнее линии этой примеси в спектре. Но проведение анализа по абсолютным значениям интенсивности линий является ненадежным, т. к. интенсивность зависит не только от процентного содержания данного элемента в образце, но и от других причин, например, от условий возбуждения спектра. Поэтому оценку интенсивности спектральной линии производят путем сравнения ее с другими спектральными линиями, интенсивности которых приняты за условный стандарт.

Таким образом, о концентрации искомой примеси мы судим по отношению интенсивностей двух линий: линии примеси и линии сравнения. Описанный метод оценки содержания искомой примеси является в настоящее время общепринятым в количественном спектральном анализе и носит название метода гомологических пар или метода внутренних стандартов.

Обычно таким стандартом, т. е. линией сравнения, является спектральная линия основы сплава. Например, для стали линиями сравнения являются линии железа, для латуни и бронзы — линии меди, для дюралюминия — линии алюминия и т. д. Однако в некоторых случаях бывает необходимо ввести в спектр другой стандарт, например, в спектр алюминиевого сплава — линии сравнения железа (взяв железный постоянный электрод), т. к. спектр алюминия беден линиями.

Для определения количественного содержания искомой примеси сравниваемые линии нужно внимательно рассмотреть и затем оценить интенсивность линии определяемого элемента относительно линии сравнения. Здесь может быть несколько способов.

1. Линия определяемого вещества и линия сравнения имеют равные интенсивности. В этом случае оценку будем обозначать знаком равенства; при этом перед знаком равенства будем ставить условное обозначение спектральной линии определяемого элемента, а

после знака — условное обозначение спектральной линии сравнения. Чтобы привести таблицы оценок к наиболее простому виду, сравниваемые спектральные линии будем обозначать условными цифрами (а не длинами волн), приводя, конечно, расшифровку этих обозначений. Например, запись оценки интенсивностей «1=4» при определении магния в алюминиевых сплавах означает, что спектральная линия магния с длиной волны 5183,62 Å равна по интенсивности линии железа с длиной волны 5168,90 Å ( $1\text{Å} = 10^{-8}\text{ см}$ ).

Запись «1=4» говорит о том, что интенсивность первой линии (5183,62 Å) равна интенсивности четвертой линии (5168,90 Å).

2. Линия определяемого элемента слабее по интенсивности, чем линия сравнения. Такую оценку будем обозначать знаком < (меньше). Знак < указывает, что интенсивность линии, стоящей слева от него, меньше, чем интенсивность линии, стоящей справа ( $1 < 4$ ).

3. Линия определяемого элемента сильнее по интенсивности, чем линия сравнения. Такую оценку будем обозначать знаком > (больше).

4. Линия определяемого элемента близка по интенсивности к линии сравнения, но либо сильнее, либо слабее ее; в этих случаях будем пользоваться соответственно значками  $\approx$  и  $\leq$ .

5. Линия определяемого элемента либо значительно слабее по интенсивности, либо значительно сильнее линии сравнения, в этих случаях будем употреблять соответственно знаки  $\gg$  и  $\ll$ .

Во всех этих случаях оценки интенсивностей будут описываться словами. Например, линия 2 видна при редких вспышках и т. д.

Спектральные линии, по которым производятся оценки концентраций, изображены на соответствующих рисунках, которые прилагаются к прибору. Эти схемы предназначены только для облегчения отыскания нужных спектральных линий. На рисунках, применяемых для анализа, линии определяемых элементов прочерчены до середины поля (укороченными), в действительности же они тянутся через весь спектр. Размытые линии изображены штрихованными полосами. На рисунках приведены только линии определяемого элемента среди линий спектра основного вещества сплава, по там отсутствуют другие линии, которые могут встречаться в сплавах.

Целью настоящей работы является полуквантитативный анализ сплавов на алюминиевой основе. Полуквантитативным анализом называется количественный анализ на несколько элементов, входящих в данный сплав, т. е. неполный количественный анализ сплава.

В качестве спектрального аппарата в нашей работе используется переносный стилоскоп СЛП-1. Переносный стилоскоп служит для быстрого визуального качественного и полуквантитативного анализа всех наиболее распространенных марок легированных сталей и цветных сплавов.

В случае необходимости переносный стилоскоп можно использовать как стационарный стилоскоп, закрепив его на подставке (что и сделано в нашей работе).

Прибор может применяться в любых производственных условиях, включая работу на открытом воздухе в сухую погоду.

Переносный стилоскоп предназначен для сортировки металлов. Анализу могут быть подвергнуты детали любой формы и конфигурации без их разборки. Стилоскоп С.Ш-1 рассчитан на применение в качестве источника возбуждения спектра активизированной дуги переменного тока. Для получения дуги переменного тока применяется особая электрическая установка, входящая в комплект прибора (переносный генератор активизированной дуги ПГД-1).

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Оптическая схема прибора изображена на рис. 1 (см. рис., приложенные к прибору). Свет от дуги, пройдя через защитные стекла 1 и 2, направляется призмой 3 на конденсор 4, который концентрирует его на щель 5 спектроскопа. Прошедший через щель свет падает на объектив 6. Последний превращает пучок лучей, расходящийся от каждой точки щели, в параллельный, и направляет его на диспергирующие призмы 7 и 8, где происходит разложение света в спектр. Большой катет призмы 8 посеребрен; отражаясь от него, лучи вновь проходят в обратном направлении призмы 8 и 7, чем достигается увеличение дисперсии прибора. Дисперсией прибора называется способность прибора разделять близкие спектральные линии. Данный прибор допускает раздельное наблюдение в окуляр пары спектральных линий ( $\lambda = 5191,46 \text{ \AA}$  и  $5192,35 \text{ \AA}$ ).

Пройдя в обратном направлении объектив 6, пучок лучей превращается в сходящийся и попадает в призму 9, которая направляет его через промежуток между призмами 7 и 8 в окуляр 10.

Стилоскоп (рис. 1, 2 и 3) состоит из головки с осветительной системой и собственно спектрального аппарата. В корпусе головки 11 находятся: защитное стекло 2, призма 3 и конденсор 4. Перед постоянным защитным стеклом 2 имеется сменное защитное стекло 1. На конце головки 11 с помощью винта 12 крепится съемная переходная планка 13, несущая три вольфрамовых контакта 37. Последние служат для убора прибора в защищенное место анализируемого объекта и подводки к объекту одного из полюсов электрической сети. На головке имеется откидной шаблон 14, предназначенный для фиксации положения стержневого электрода 19.

Головка изолируется от остальной части прибора изолятором 17. В отверстии изолятора находится разрезная втулка 18, в которую вставляется электрод 19 или держатель медного дискового электрода 33. Закрепляется электрод винтом 20.

Напряжение от генератора подводится к головке и электродуге при помощи двух проводов 21 и 22.

Необходимый при работе разворот призмы 3 осуществляется с помощью маховичка 36. Спектральный аппарат заключен в корпус 23, на котором укреплен окуляр 24, а с помощью трубки 25 присоединен изолятор с головкой. В трубке 25 помещается оправа со шелью. В поле зрения окуляра имеется указатель для фиксации спектральных линий. На окулярной части закреплен резиновый наглазник и палочник 26.

На корпусе смонтирован маховичок 27 со шкалой 28. Вращением маховичка 27 осуществляется поворот призмы 8, вследствие чего спектр перемещается в поле зрения окуляра. К корпусу винтами 29 крепится ручка 30 с заключенным в ней механизмом включения генератора, представляющим собой кнопку-выключатель 31. Ручка 30 служит для удержания прибора во время работы.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед каждым анализом конец постоянного электрода 19 должен быть тщательно заточен и зачищен.

На анализируемом объекте зачищается площадка размером, примерно,  $2 \times 2 \text{ см}^2$ . На расстоянии 8 см от края зачищенной площадки ( $2 \times 2 \text{ см}^2$ ) зачищается вторая площадка размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . При зачистке удаляются краска и окалина. Зачистка производится с помощью напильника и наждачной бумаги.

После этого стилоскоп устанавливают таким образом, чтобы упорный контакт 37 на конце головки уперся в меньшую из зачищенных площадок, а электрод оказался бы против середины большей площадки. Рукояткой регулятора устанавливают величину дугового промежутка между анализируемым объектом и электродом (1—2 мм). Затем нажимают кнопку-выключатель 31. При этом должна загореться дуга (если дуга не загорается, поставить в известность преподавателя или лаборанта).

Когда дуга загорится, наблюдают спектр. Если яркость спектра и резкость линий при этом окажутся недостаточными, необходимо разворотом призмы 3 (вращая маховичок 36) добиться требуемой яркости спектра. Вращением накатанного кольца окуляра 24 добиваются максимально резкого изображения спектральных линий и приступают к проведению анализа.

### Упражнение 1

#### Определение концентрации магния в сплавах на алюминиевой основе\*

Для количественных оценок содержания Mg дугу зажигают с железным стандартным электродом. Определения следует производить через 20—30 сек после зажигания дуги.

\* Фотографии спектрограмм (4, 5, 6, 7) и дисперсионная кривая приложены к установке.

Присутствие Mg в сплаве устанавливается по появлению зеленых линий 5183,62 Å и 5172,70 Å. Для нахождения этого участка спектра пользуются дисперсионной кривой, которая связывает длину волны спектральных линий с отсчетом по шкале маховичка 27. По дисперсионной кривой определяют, какое деление маховичка должно располагаться против риски, чтобы в поле зрения окуляра находился данный участок спектра. Установив соответствующее деление маховичка, внимательно рассматривают спектр и, сравнивая его со спектрограммой *A*, устанавливают на линию *1*. Убедившись, что указатель установлен правильно, сравнивают интенсивность линии *1* поочередно с интенсивностями линий, указанных в таблице 1. Затем указатель переводят на линию *2* и сравнивают с соответствующими линиями.

Условные обозначения линий и оценки интенсивностей линий даны в таблицах 1 и 2.

Результаты наблюдений заносятся в таблицу 3.

Таблица 1

Линии магния		Линии сравнения	
длина волны, в Å	условные обозначения	длина волны в Å	условные обозначения
5183,62	1	5187,90	3
5172,70	2	5168,90	4
		5171,60	5
		5159,05	6
		5167,49	7

Таблица 2

Оценки для определения магния

Содержание магния в %	Оценка интенсивностей спектральных линий	
0,01	1=4	1=3, линия 2 не видна
0,05	1=4	линия 2 видна при редких вспышках
0,08	1=6	линия 2 видна при частых вспышках
0,1	1=5	2=4
0,2	2=5	
0,5	2=5	1=7
1,0	1=7	
2,0	2=7	

Таблица 3

№ образца	Оценка интенсивностей спектральных линий	Содержание магния в %

## Упражнение 2

## Определение концентрации марганца в сплавах на алюминиевой основе

Присутствие марганца в сплаве устанавливается по наличию линии 4823,52 Å (спектрограмма 5).

Количественные определения производят с железным стандартным электродом. Определения следует производить через 20—30 сек. после зажигания дуги. Условные обозначения линий и оценки интенсивностей даны в таблицах 4 и 5.

Результаты наблюдений заносят в таблицу 6.

Таблица 4

Линия марганца		Линии сравнения	
$\lambda$ в Å	условные обозначения	$\lambda$ в Å	условные обозначения
4823,52	1	4789,65	2
		4858,75	3
		4871,32	4

Таблица 5

Содержание марганца в %	Оценки интенсивностей спектральных линий	
0,2	1 > 2;	1 < 3
0,5	1 = 3	
1,0	1 > 3;	1 < 4
2,0	1 = 4	

Таблица 6

№ образца	Оценки интенсивностей спектральных линий	Содержание марганца, %

### Упражнение 3

#### Определение кремния в сплавах на алюминиевой основе

Определение кремния проводят по группе  $Si_2$  (спектрограмма 7), возбуждая спектр дугой переменного тока при искровом режиме.

В таблицах 7 и 8 приведены условные обозначения спектральных линий и оценки интенсивностей их при различном содержании кремния.

Определения следует производить через 20—30 сек после зажигания дуги. Результаты наблюдений заносят в таблицу 9.

Таблица 7

Линии кремния		Линии сравнения	
$\lambda$ в Å	условные обозначения	$\lambda$ в Å	условные обозначения
$Si_1$ 3905,53	1	3902,95	2
		3903,9	3
$Si_2$ 6347,01	1	6408,03	3
$Si_2$ 6371,09	2	6421,35	4
		6411,66	5
		6393,66	6
		6400,02	7
		6243,36	8

Таблица 8

Содержание кремния, %	№ группы	Оценки интенсивностей спектральных линий	
0,15—0,2	$Si_2$	1=3;	1—два видна; линия 2 не видна
0,2—0,3	$Si_2$	1=3;	1—видна; линия 2 едва видна
0,4—0,5	$Si_2$	1=3	
0,7	$Si_2$	1=4;	2=3
1,0	$Si_2$	1=5;	2=4
1,0	$Si_1$	1=3	
1,3	$Si_2$	1=6;	2=4
1,7	$Si_2$	1=7;	2=6
2,0—2,5	$Si_2$	1=7;	2=6
4,0—4,5	$Si_2$	1=7;	2>6
6,0—7,0	$Si_2$	1=8	
8,0—10	$Si_2$	1=8;	2=7
15	$Si_2$	1=8;	2>7
20	$Si_2$	2=8	
20	$Si_1$	1>2	
30	$Si_1$	1>2	

№ образца	№ группы	Оценки интенсивностей спектральных линий	Содержание кремния, %

### Контрольные вопросы

1. Начертите оптическую схему стилоסקопа СЛП-1.
2. В чем отличие качественного анализа от количественного?
3. В чем заключается смысл метода гомологических пар?

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Кортнев. Практикум по физике. М., изд. «Высшая школа», 1963, глава 28.
2. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Гостехиздат, 1952, § 196—198.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ $\beta$ -ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ПОГЛОЩЕНИЯ

**Принадлежности:** универсальный радиометр, радиоактивный препарат, секундомер, набор экранов различной толщины.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Радиоактивностью называют самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождающееся испусканием различных видов радиоактивных излучений.

Исследования показали, что радиоактивные излучения обладают следующими свойствами:

ионизуют газы;

обладают большой проникающей способностью;

способны вызывать биологические и химические действия;

возбуждают флюоресценцию многих жидких и твердых тел;

температура радиоактивных веществ всегда выше температуры окружающей среды. Это показывает, что радиоактивный процесс сопровождается непрерывным выделением энергии.

Количество радиоактивного излучения, испускаемого радиоактивным веществом, характеризуется активностью этого вещества.

В международной системе единиц (СИ) единицей активности является  $1 \frac{\text{распад}}{\text{сек}}$ . Допускается применение внесистемных единиц:  $\frac{\text{распад}}{\text{мин}}$ , *кюри*, *резерфорд*.

1 *кюри* — это такая активность, при которой за 1 *сек* распадается  $3,7 \cdot 10^{10}$  атомов.

$$1 \text{ резерфорд (rd)} = 10^6 \frac{\text{распад}}{\text{сек}}.$$

Если происходит облучение какого-либо объекта, то количество поглощенного излучения выражают дозой или мощностью дозы.

Поглощенной дозой любого ионизирующего излучения  $D$  называют количество энергии  $E$ , поглощенной единицей массы облучаемого объекта за все время облучения

$$D = \frac{E}{m}.$$

Единицей поглощенной дозы излучения служит  $1 \frac{\text{дж}}{\text{кг}}$ .

Часто пользуются также понятием экспозиционной дозы. Экспозиционная доза рентгеновского и  $\gamma$ -излучений есть величина, равная отношению суммы электрических зарядов всех ионов одного знака, созданных в воздухе, при полном использовании ионизирующей способности всеми электронами, образованными фотонами в воздухе, к массе этого воздуха:

$$D_x = \frac{q}{m}.$$

За единицу экспозиционной дозы излучения принимается рентген ( $\rho$ ) — это такое количество рентгеновских или  $\gamma$ -лучей, при котором в  $1,2930 \cdot 10^{-6}$  кг воздуха образуются ионы с суммарным зарядом  $3,35 \cdot 10^{-10}$  к каждого знака. Это соответствует образованию  $2,08 \cdot 10^9$  пар одновалентных ионов в  $10^{-6}$  м<sup>3</sup> воздуха при нормальных условиях и связано с поглощением около  $84 \cdot 10^{-4}$  дж энергии 1 кг воздуха.

Рентген — внесистемная единица. В СИ единицей экспозиционной дозы излучения является  $1 \frac{\text{К}}{\text{кг}}$ . Легко сообразить, что

$$1 \rho = 2,57976 \cdot 10^{-4} \frac{\text{К}}{\text{кг}}.$$

Для оценки биологического воздействия любого излучения вводится понятие биологического эквивалента рентгена ( $\text{бэр}$ ). Биологический эквивалент рентгена — количество энергии, поглощенное тканью и биологически эквивалентное 1  $\rho$  рентгеновских или  $\gamma$ -лучей. Безопасной для человека считается доза облучения 0,017 бэр за рабочий день.

Анализ состава радиоактивного излучения был произведен впервые М. Кюри по отклонению радиоактивных излучений в магнитном поле. На рис. 1 изображена схема разделения  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей в магнитном поле, направленном перпендикулярно к плоскости рисунка.

Характер отклонения лучей в магнитном поле показывает, что

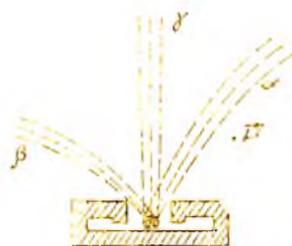


Рис. 1

$\alpha$ -лучи несут положительный заряд,  $\beta$ -лучи — отрицательный, а  $\gamma$ -лучи не заряжены.

$\alpha$ -лучи, испускаемые данным радиоактивным элементом, практически однородны, т. е. начальная энергия всех их почти постоянна. Они вызывают сильную ионизацию молекул среды, благодаря чему обладают малой проникающей способностью: длина пробега их в газе, например, в воздухе при нормальных условиях, составляет несколько сантиметров (от 2,6 до 11,5 см), а в жидких и твердых веществах — всего несколько десятков микрон.

Траектории  $\alpha$ -частиц в веществе представляют собой прямые линии, и характерной константой  $\alpha$ -излучения является длина пробега частиц в воздухе при нормальных условиях.

По величине пробега можно судить о величине энергии, с которой  $\alpha$ -частица вылетает из ядра.

$\beta$ -лучи представляют собой поток электронов (реже — позитронов) и, в отличие от  $\alpha$ -лучей, имеют сложный энергетический спектр.

Первичные  $\beta$ -лучи, испускаемые при распаде ядер, имеют непрерывный энергетический спектр. Нижняя граница энергии в спектре  $\beta$ -частиц определяется чувствительностью метода исследования; верхняя граница энергии является характерной константой для каждого  $\beta$ -радиоактивного изотопа.

$\gamma$ -лучи представляют собой очень короткие электромагнитные волны ( $\lambda < 1 \text{ \AA}$ ).

Поглощение первичного  $\beta$ -излучения в веществе приближенно подчиняется простому показательному закону:

$$N = N_0 l^{-\mu d}, \quad (1)$$

где  $N$  — число электронов, прошедших через слой толщиной  $d$ , из числа электронов  $N_0$ , падающих на переднюю поверхность слоя за некоторое время  $t$ ,

$\mu$  — коэффициент поглощения.

Часто вместо коэффициента поглощения указывают толщину полупоглощения  $d_{\frac{1}{2}}$ , при которой  $N = \frac{1}{2} N_0$ .

Из (1) следует, что

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}. \quad (2)$$

Если написать формулу (1) в виде

$$N = N_0 l^{-\frac{\rho}{\rho} \mu d},$$

то поглощение можно характеризовать величиной

$$P = \rho d_{\frac{1}{2}} = \rho \rho^{-1} \cdot \text{см}^{-3} d_{\frac{1}{2}} \text{ см} = \rho d_{\frac{1}{2}} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Учитывая (2), можно написать:

$$P = \frac{0,693}{\mu} \rho.$$

Большинство используемых на практике радиоактивных изотопов испускает  $\beta$ -лучи или  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи одновременно. Как было указано выше, константой радиоактивного изотопа в этих случаях является максимальная энергия  $\beta$ -частиц.

Между максимальной энергией излучения и толщиной поглотителя существует известная зависимость, представленная графически на рис. 6. Пользуясь этой зависимостью, можно найти максимальную энергию  $\beta$ -излучения, если предварительно определить экспериментально толщину поглотителя.

Для определения толщины поглотителя помещают между источником излучения и приемной частью измерительного прибора экраны различной толщины и определяют число частиц, проходящих через них за единицу времени. Результаты измерения удобно представить графически в полулогарифмическом масштабе. Для этого по оси абсцисс откладывают толщину слоя поглотителя, а по оси ординат — натуральный логарифм числа зарегистрированных частиц в единицу времени. В случае однокомпонентного излучения и небольшого различия в скоростях  $\beta$ -частиц получается близкая к теоретической линия, тангенс угла наклона которой соответствует коэффициенту поглощения излучения (рис. 2).

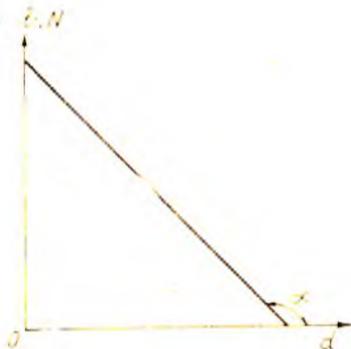


Рис. 2

## МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Основными методами являются следующие.

1. Ионизационные методы, которые основаны на ионизирующем действии излучений радиоактивных элементов. Приборами, в которых используется ионизация газов  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучами, служат ионизационные камеры, пропорциональный счетчик и счетчик Гейгера-Мюллера. Для регистрации следов движения отдельных ионизирующих частиц применяются камеры Вильсона, а также пузырьковые камеры.

2. Сцинтилляционные методы, основанные на люминесценции некоторых твердых и жидких веществ под действием излучения. Измерение люминесценции может производиться визуально с помощью микроскопа (спинтарископ) и с помощью фотоэлектронного умножителя (сцинтилляционный счетчик).

3. Методы, основанные на электронной эмиссии металлов под действием радиоактивных излучений и под действием ядерных частиц.

4. Радиографические методы, основанные на химическом действии радиоактивных излучений и ядерных частиц на фотографические эмульсии.

5. Методы, основанные на эффекте Вавилова-Черенкова (черенковские счетчики).

Рассмотрим работу счетной трубки Гейгера-Мюллера, схема которой показана на рис. 3.



Рис. 3

Основные ее части: 1 — алюминиевый корпус счетной трубки (катод); 2 — вольфрамовая нить (анод); 3 — стеклянные изоляторы; 4 — вывод нити (колпачок).

Внутренняя полость счетной трубки может заполняться как чистыми газами — гелием, неоном, аргоном, азотом, так и смесями их с парами органических веществ, например, с парами спирта (самогасящиеся счетчики).

Давление газа в счетной трубке может составлять от 50 до 760 мм рт. ст. и зависит от рода наполняющих газов и назначения счетчика.

Механизм разряда в счетных трубках заключается в следующем: на счетную трубку подают высокое напряжение, такое, при котором еще не возникает самостоятельный разряд в газе, наполняющем междуэлектродный промежуток. Быстрая частица, попав в счетную трубку, сталкиваясь с молекулами наполняющего газа, образует положительные ионы и электроны. Электроны, двигаясь в электрическом поле к нити, также ионизируют молекулы, образуя новые электроны и ионы. Так, благодаря ударной ионизации, возникает лавинный разряд.

Лавины возникают также и у катода за счет вырванных из него положительных ионами электронов. Таким образом, весь объем счетной трубки за очень короткий промежуток времени ( $10^{-7}$ — $10^{-8}$  сек) охватывается разрядом. Разряд соз-

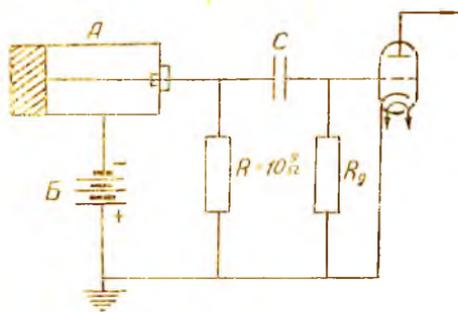


Рис. 4

дает импульсы напряжения на управляющей сетке входной лампы усилителя. Регистрацию разрядных импульсов в настоящее время обычно производят посредством механических приспособлений (номераторов), приводимых в действие ламповыми усилителями.

Разряд будет продолжаться до тех пор, пока не будет прекращен какими-либо внешними причинами. Наиболее просто внешнее гашение осуществляют, включая последовательно со счетной трубкой высокоомное сопротивление  $R$  порядка  $10^9$  ом. При этом лавинный разряд приводит к уменьшению напряжения между корпусом и цитью счетной трубки (рис. 4) до такой величины, при которой дальнейший процесс лавинообразования становится невозможным. Следующий разряд может произойти лишь после восстановления прежнего напряжения на электродах трубки (до напряжения батареи Б).

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Используемый в настоящей работе прибор типа «ТНСС» является переносным лабораторным радиометром, предназначенным для измерения загрязненности одежды, рук и поверхностей  $\alpha$ - или  $\beta$ -активными веществами. Он состоит из блока ТЗ (в нем находятся ламповый усилитель, механический счетчик и силовая часть) и блока ТЧ (содержащего три газовые счетные трубки типа СТС-6, соединенные параллельно) для обнаружения  $\beta$ -излучения.

На передней панели блока ТЗ расположены следующие тумблеры и ручки управления: 1 — тумблер сети; 2 — тумблер механического счета; 3 — ручки установки нуля механического счетчика, 4 — ручка установки нуля измерительного прибора; 5 — переключатель диапазонов.

На задней панели блока ТЗ имеются: 6 — тумблер рода работы; 7 — гнездо выносного блока ТЧ; 8 — колодка питающей сети; 9 — предохранитель; 10 — тумблер компенсации фона.

Прибор позволяет регистрировать число импульсов, поступающих на его вход от счетных трубок, с помощью механического счетчика и измерять среднюю скорость поступления импульсов по стрелочному прибору, шкала которого градуирована в импульсах в минуту (верхняя). По этому прибору можно измерить среднюю скорость поступления импульсов в диапазоне от 0 импульсов до  $10^5$  импульсов в минуту. Весь диапазон измерения разбит на 6 поддиапазонов: 0—300; 0— $10^3$ ; 0— $3 \cdot 10^3$ ; 0— $10^4$ ; 0— $3 \cdot 10^4$  импульсов в минуту.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В настоящей работе в качестве источника радиоактивного излучения используется мезоторий-1 (один из элементов радиоактивного ряда тория) с периодом полураспада 6,7 года, который применяют для изготовления красок, светящихся в темноте, и которым

покрывают шкалы авиационных, корабельных приборов, стрелки и циферблаты часов, компасов и т. д.

Радиоактивное излучение мезотория-1 состоит из  $\beta$ -частиц и незначительного количества  $\gamma$ -лучей. Используемые источники имеют активность, меньшую 0,01 микрокюри.

Все радиоактивные излучения вредно действуют на живой организм, вследствие чего при работе с радиоактивными препаратами необходимы меры предосторожности (см. инструкцию по технике безопасности, имеющуюся на рабочем месте).

Для приведения радиометра в рабочее состояние необходимо:

1. Соединить сетевой шнур с сетью переменного тока, включить прибор (загорается сигнальная лампочка) и прогреть его в течение 10—15 минут.

2. Стрелки механического счетчика поставить на нуль шкалы с помощью ручек установки (это делается каждый раз перед началом измерения). При отсчете необходимо учитывать множители  $\times 100$  и  $\times 1$ , стоящие на шкалах.

3. Перевести переключатель шкал в положение 10Г.

4. Тумблеры «Уст. нуля — Работа», а также «Проверка — Работа» поставить в положение «Работа».

Не помещая препарат и экран в «домик» (освинцованный ящик, в котором находятся счетные трубки), включить одновременно секундомер и механический счетчик и в течение 6 минут сосчитать  $\gamma$ -фон помещения (средняя скорость счета при отсутствии радиоактивных препаратов).

Поставить препарат в «домик» и снова измерить число частиц, регистрируемых прибором в единицу времени (число импульсов в минуту), так же, как это делалось при определении  $\gamma$ -фона помещения.

**Относительное расположение счетных трубок и препарата во все время опыта не менять!**

Затем между счетными трубками и препаратом поместить тонкий алюминиевый экран известной толщины и сделать новый отсчет. Потом добавлять второй, третий, четвертый и т. д. экраны (в порядке возрастания их толщины), определяя каждый раз скорость счета.

Результаты измерений свести в таблицу:

№ п/п	Суммарная толщина экрана $d, \text{см}$	Число импульсов $N$	Время измерения $t$	Число импульсов в минуту $\frac{N}{t}$	Фон, $\frac{\text{имп}}{\text{мин}}$	Число импульсов в минуту без фона
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Установку новых экранов следует прекратить, когда их влияние окажется достаточно малым.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По полученным данным построить график, откладывая на оси абсцисс суммарную толщину экранов в сантиметрах, а на оси ординат — натуральный логарифм числа импульсов в минуту (рис. 5).

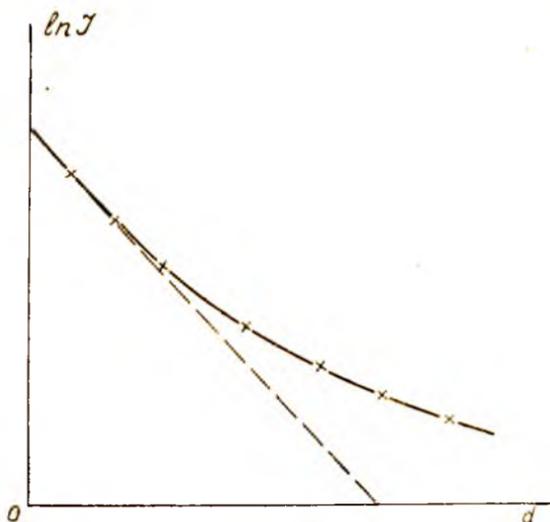


Рис. 5

Массой слоя воздуха и толщиной стенок счетных трубок можно пренебречь, т. к. они задерживают лишь частицы с малой энергией.

Строго говоря, таким путем получается суммарная кривая поглощения  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -излучения. Но так как данный излучатель имеет слабое  $\gamma$ -излучение, обладающее значительно большей проникающей способностью по сравнению с  $\beta$ -излучением, и относительно сильное  $\beta$ -излучение, задерживаемое полностью сравнительно тонкими экранами из алюминия, то, анализируя кривую, можно сказать, что почти прямолинейный участок кривой (начальный) соответствует поглощению электронов, а остальной участок — поглощению  $\gamma$ -излучения.

2. Найти тангенс угла наклона прямолинейной части графика, соответствующей поглощению электронов

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu.$$

3. По формуле (2) найти толщину полупоглощения в сантиметрах.

4. Умножив толщину полупоглощения  $d \frac{1}{2}$  на плотность

алюминия  $\rho$  ( $2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ), выразить толщину слоя полупоглощения через массу поглотителя, приходящуюся на единицу площади сечения поглощающего слоя.

(Так как  $m = \rho \cdot s \cdot d_{\frac{1}{2}}$ , то

$$P = \rho \cdot d_{\frac{1}{2}} = \frac{m}{s}.$$

5. По графику (рис. 6) найти максимальную энергию  $\beta$ -частиц.

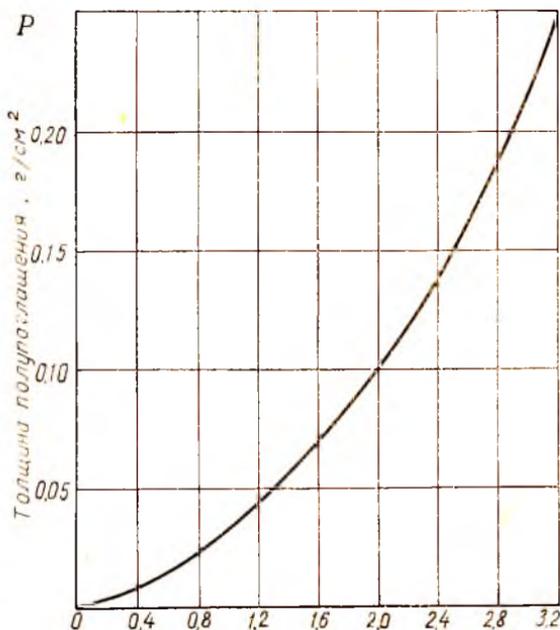


Рис. 6

Энергия в Мэв

График зависимости слоя полупоглощения  $\beta$ -лучей от их энергии в алюминии.

### Контрольные вопросы

1. Какими свойствами обладают радиоактивные излучения?
2. В каких единицах измеряется активность радиоактивного вещества?
3. Что такое доза излучения и в каких единицах она измеряется?
4. Какому закону подчиняется поглощение первичного  $\beta$ -излучения в веществе?
5. Какие существуют методы регистрации радиоактивных излучений?
6. Каково устройство и принцип действия счетчика Гейгера-Мюллера?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1967, § 90, 95.
  2. Б. М. Яворский. Курс физики, т. 3, М., изд. «Высшая школа», 1967, § 17.1, 17.2, 17.4.
  3. К. А. Путилов и В. А. Фабрикант. Курс физики, т. 3, М., Физматгиз, 1963, § 89, 96.
-

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ  
ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ**

**Принадлежности:** оптическая скамья, диафрагма со щелью, набор светофильтров, бипризма, микроскоп, собирающая линза, источник света.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

С точки зрения классической электродинамики свет представляет собой поперечные электромагнитные волны, распространяющиеся в вакууме со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/сек. Длины волн видимого света заключены в пределах:  $\lambda_0 = 400 \div 750$  мкм. При наложении световых волн, как и волн любой природы, наблюдается явление интерференции, в результате которого в одних местах интенсивность света возрастает, а в других — убывает. Необходимым условием интерференции волн является их когерентность: равенство частот и постоянство разности фаз.

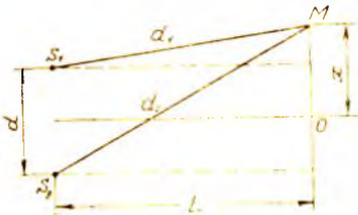


Рис. 1

Пусть от источников  $S_1$  и  $S_2$  расходятся синусоидальные когерентные волны так, что колебания происходят перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 1). Рассмотрим интерференцию этих волн в точке  $M$ .

Обозначим модуль амплитуды светового вектора буквой  $A$  и положим для простоты, что  $A_1 = A_2 = A$ . Колебания в точке  $M$ , вызываемые первой и второй волнами, можно выразить так:

$$S_1 = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda} \right) \quad \text{и}$$

$$S_2 = A \cos \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda} \right) - \varphi \right],$$

где  $d_1 = S_1M$ ,  $d_2 = S_2M$ ,  $\lambda$  — длина волны,  $\varphi$  — начальная фаза. Тогда уравнение результирующего колебания будет иметь вид:

$$S = S_1 + S_2 = 2A \cos \left( \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} + \frac{\varphi}{2} \right) \cos \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_2 + d_1}{2\lambda} \right) - \frac{\varphi}{2} \right].$$

Таким образом, результирующее колебание в точке  $M$  имеет амплитуду

$$A_0 = 2A \cos \left( \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} + \frac{\varphi}{2} \right).$$

Интенсивность результирующей волны пропорциональна квадрату амплитуды:

$$I \sim 4A^2 \cos^2 \left( \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} + \frac{\varphi}{2} \right).$$

Величина  $\varphi$  — постоянна, следовательно, интенсивность света в точке  $M$  зависит только от разности расстояний  $\Delta = d_2 - d_1$ . Благодаря этой разности возникает добавочная разность фаз

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}.$$

Если начальная фаза  $\varphi$  равна нулю, то амплитуда  $A_0$  максимальна при условии:

$$\frac{\pi \Delta}{\lambda} = k\pi, \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots). \quad (1)$$

При условии

$$\frac{\pi \Delta}{\lambda} = (2k + 1) \frac{\pi}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

амплитуда  $A_0$  минимальна (в данном случае равна нулю, т. к. мы положили  $A_1 = A_2$ ).

Из выражений (1) и (2) получим условия максимума и минимума интенсивности в такой форме.

$$\Delta = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2} \text{ — макс.} \quad (3)$$

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ — мин.} \quad (4)$$

Максимальная интенсивность результирующей волны получается в тех точках, для которых разность хода равна четному числу полуволн, а минимальная — в тех точках, для которых разность хода равна нечетному числу полуволн. Число  $k$  называют порядком максимума или минимума.

В результате интерференции света на экране возникает картина чередования светлых и темных полос.

Опыт показывает, нельзя получить интерференционную картину от двух независимых источников света (например, от двух

лампочек). Это объясняется тем, что естественные источники света не когерентны. Излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемых его атомами. В каждом атоме процесс излучения длится очень короткое время, порядка  $10^{-8}$  сек. После прекращения свечения атом может вновь «вспыхнуть», но уже с новой начальной фазой. Одновременно в источнике света «вспыхивает» большое количество атомов. Возбуждаемые ими цуги волн, налагаясь, образуют испускаемую телом световую волну. При этом фаза результирующей волны претерпевает случайные, скачкообразные изменения.

Когерентные световые волны можно получить, используя излучение одного и того же источника. Для этого необходимо испускаемое излучение расщелить на два потока (путем отражения или преломления) и заставить эти потоки интерферировать после того, как они пройдут различные оптические пути. Это можно осуществить, например, с помощью бипризмы Френеля.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ $\lambda$

Бипризму Френеля можно представить как две призмы с малыми преломляющими углами, сложенные основаниями (рис. 2).

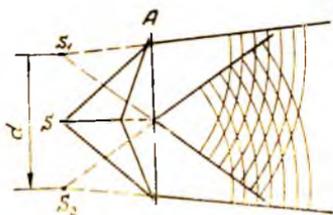


Рис. 2

Падающий от щели  $S$  пучок света после преломления в бипризме делится на два перекрывающихся пучка, как бы исходящих из двух мнимых изображений щели  $S_1$  и  $S_2$ . Так как источники  $S_1$  и  $S_2$  когерентны, то на экране наблюдается интерференционная картина. Положение максимумов и минимумов освещенности в этой картине можно рассчитать, пользуясь рис. 1.

$$d_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 = L^2 + x^2 + xd + \frac{d^2}{4},$$

$$d_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 = L^2 + x^2 - xd + \frac{d^2}{4},$$

$$d_2^2 - d_1^2 = 2xd,$$

$$d_2 - d_1 = \frac{2xd}{d_2 + d_1}.$$

Наклон линий  $S_1M$  и  $S_2M$  очень мал, поэтому длина их очень мало отличается от расстояния  $L$ .

Полагая, что  $d_2 + d_1 = 2L$ , для разности хода двух лучей получаем:

$$\Delta = d_2 - d_1 = \frac{xd}{L}.$$

Согласно формуле (3) для светлых полос имеем:

$$\frac{x_k d}{L} = k\lambda, \quad (5)$$

Аналогично для темных полос получается:

$$\frac{x_k d}{L} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) можно найти расстояние  $\Delta x$  между двумя соседними светлыми полосами или темными.

Для светлых полос порядка  $k$  и  $k+1$  имеем:

$$x_k = \frac{L}{d} k\lambda, \quad x_{k+1} = \frac{L}{d} (k+1)\lambda.$$

Следовательно,  $\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{L\lambda}{d}$ .

Такое же выражение получаем и для расстояния  $\Delta x$  между двумя темными полосами. Это расстояние назовем шириной интерференционной полосы. Таким образом, измерив расстояние между двумя соседними светлыми или темными полосами, можно определить длину световой волны:

$$\lambda = \frac{\Delta x \cdot d}{L}. \quad (7)$$

Для этого на оптической скамье устанавливают осветитель  $O$ , экран со щелью  $1$ , бипризму  $2$ , светофильтр  $3$ , микроскоп  $4$ , в который наблюдают интерференционную картину (рис. 3).

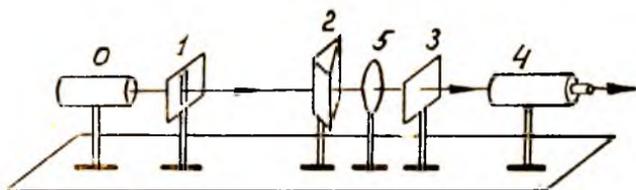


Рис. 3

Так как расстояние между щелью  $S$  (см. рис. 2) и микроскопом велико по сравнению с расстоянием между изображениями щели  $S_1$  и  $S_2$ , то можно считать, что точки  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S$  лежат в одной плоскости, перпендикулярной оптической оси. Чтобы определить расстояние  $d$  между мнимыми источниками  $S_1$  и  $S_2$ , на оптическую скамью между бипризмой и светофильтром помещают собирающую линзу  $5$ , которая дает два действительных изображения щели  $S$  (рис. 4) в плоскости светофильтра.

Из рис. 4 видно, что

$$\frac{d}{d'} = \frac{a}{b}, \quad \text{т. е. } d = \frac{a}{b} d'.$$

Подставляя полученное значение  $d$  в уравнение (7), получаем

$$\lambda = \frac{\Delta x \cdot a}{L \cdot b} \cdot d'. \quad (8)$$

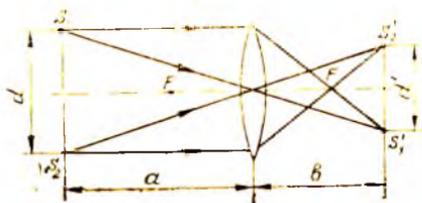


Рис. 4

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить правильность расположения приборов на оптической скамье, согласно рис. 3.

2. Определить положение плоскости рассматриваемого объекта интерференционной картины. Для этого нужно выбрать и установить соответствующим образом подвижную часть микроскопа, пользуясь таблицей 1. В этой таблице указана цена деления шкалы окуляра в плоскости объекта, соответствующая различным длинам тубуса. Затем перемещением глазной линзы окуляра добиваются резкого изображения его шкалы, вставляют в рамку светофильтра лист бумаги с напечатанным текстом и, перемещая его относительно микроскопа, находят положение наилучшей видимости текста. В этом положении закрепляют держатель и вставляют светофильтр вместо листа бумаги. Плоскость светофильтра и будет плоскостью рассматриваемого объекта.

Таблица 1

Длина тубуса, мм	Цена деления шкалы, мм
130	0,058
140	0,053
150	0,049
160	0,045
170	0,041
180	0,038
190	0,036

3. Снять линзу 5 со скамьи и включить осветитель. В микроскоп будут видны темные и светлые полосы на фоне делений изображения окулярной шкалы. Измеряя расстояние  $n \cdot \Delta x$  между двумя до-

статочно удаленными друг от друга темными или светлыми полосами, определить расстояние  $\Delta x$  между двумя соседними интерференционными полосами.

4. Измерить расстояние  $L$  между щелью и найденной плоскостью рассматриваемого объекта.

5. Снова поставить на оптическую скамью линзу 5. Передвигая ее, добиться того, чтобы изображения щели  $S'_1$  и  $S'_2$  были отчетливо видны в микроскоп. Затем измерить расстояние  $d'$  между этими изображениями.

6. Измерить расстояние  $a$  и  $b$ . По формуле (8) вычислить длину световой волны.

7. Заменить красный светофильтр зеленым и определить длину световой волны для зеленых лучей.

8. Повторить опыт при другом увеличении микроскопа.

Таблица 2

№ опыта	Фильтр	$C$ —цена деления шкалы окуляра микроскопа	$(n \cdot \Delta x)$ —расстояние между удаленными интерф. полосами	$n$ —число интервалов между полосами	$\Delta x$	$d'$	$a$	$b$	$L$	$\lambda$

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление интерференции?
2. Какие источники волн называются когерентными?
3. Почему тупой угол биризммы Френеля должен быть близким к  $180^\circ$ ?
4. Какой вид будет иметь интерференционная картина, если убрать светофильтр?

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. III, М., изд. «Наука», 1966.
2. А. В. Кортнев и др. Практикум по физике, М., изд. «Высшая школа», 1963.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ СПЕКТРОМЕТРОМ

**Принадлежности:** гониометр-спектрометр ГС-5, гелиевая разрядная трубка, электрическая лампа, стеклянная призма.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При падении плоской волны  $CA$  на плоскую границу раздела двух прозрачных сред  $MN$  фронт преломленной волны  $DB$  также представляет собой плоскость (рис. 1). Однако, поскольку отрезки  $AB$  и  $CD$  пройдены волной в разных средах и за одно и то же время  $t$  ( $AB = v_1 t$ ,  $CD = v_2 t$ ), то, так как скорости световой волны в средах I и II не одинаковы, фронт волны поворачивается при переходе в другую среду на некоторый угол — наблюдается преломление.

Количественно преломление света характеризуется коэффициентом преломления, который равен, согласно волновой теории, отно-

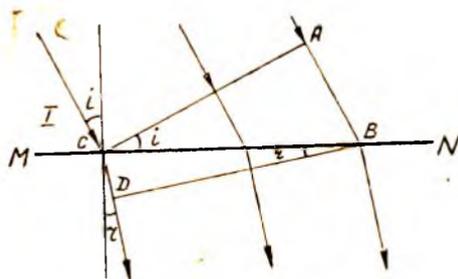


Рис. 1

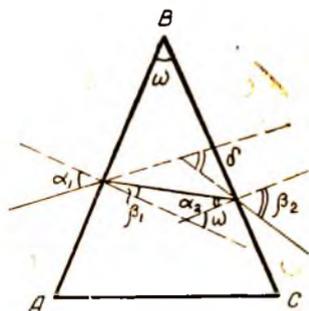


Рис. 2

шению скорости световой волны в первой среде к скорости ее во второй среде

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Из рис. 1 видно, что  $AB = CB \sin i$  и  $CD = CB \sin r$ , так что коэффициент преломления

$$n_{2,1} = \frac{AB}{CD} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Рассмотрим преломление монохроматического луча в призме, находящейся в воздухе ( $n_{\text{возд.}} = 1$ ).

Угол  $\omega$  между плоскостями  $AB$  и  $BC$  является преломляющим углом (рис. 2). Из того же рисунка следует:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n, \quad \beta_1 + \alpha_2 = \omega, \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{1}{n}.$$

Проходя через призму, луч отклоняется от первоначального направления на некоторый угол  $\delta$ , который равен:

$$\delta = \alpha_1 - \beta_1 + \beta_2 - \alpha_2 = \alpha_1 + \beta_2 - \omega.$$

Угол наименьшего отклонения наблюдается при симметричном прохождении луча через призму, т. е. в случае, когда  $\beta_1 = \alpha_2 = \frac{\omega}{2}$ .

При этом

$$\alpha_1 - \beta_1 = \beta_2 - \alpha_2 = \frac{\delta}{2},$$

откуда

$$\alpha_1 = \beta_1 + \frac{\delta}{2} = \frac{\omega}{2} + \frac{\delta}{2}.$$

Последнее равенство позволяет определить коэффициент преломления  $n$  по измеренным значениям угла наименьшего отклонения  $\delta$  и преломляющего угла призмы  $\omega$ :

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\omega}{2} + \frac{\delta}{2}\right)}{\sin\frac{\omega}{2}}.$$

Измеренный предлагаемым способом показатель преломления стекла для данного монохроматического луча с длиной волны  $\lambda_1$  можно сравнить с показателем преломления для другого монохроматического луча с длиной волны  $\lambda_2$ .

Величина  $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$  называется дисперсией вещества и зависит от материала, из которого сделана призма.

Для всех прозрачных веществ  $n$  монотонно возрастает с уменьшением длины волны  $\lambda$ , т. е. фиолетовые лучи преломляются сильнее красных, что соответствует ходу нормальной дисперсии.

В данной лабораторной работе в качестве источника монохроматического излучения применяется гелиевая разрядная трубка, из

спектра видимого излучения которой используются семь ярких спектральных линий (см. таблицу измерений).

После того, как значения показателя преломления  $n$  стекла определены для всех наблюдаемых спектральных линий, строят график зависимости  $n = f(\lambda)$  (дисперсионную кривую).

По дисперсионной кривой определяется средняя дисперсия

$$\bar{D} = \frac{n_F - n_C}{\lambda_F - \lambda_C}$$

и коэффициент дисперсии  $\nu$  (число Аббе)

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

где  $n_D$ ,  $n_F$  и  $n_C$  — значения показателя преломления для  $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$  (среднее значение длины волны желтого дублета натрия)  $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}$  (голубая линия водорода),  $\lambda_C = 6563 \text{ \AA}$  (красная линия водорода). Все эти значения определяются по полученному графику.

Средняя дисперсия  $\bar{D}$  и коэффициент дисперсии  $\nu$  являются важными характеристиками. Значениями этих параметров обычно характеризуют оптические стекла, причем вместо средней дисперсии  $\bar{D}$  в таблицах приводится величина  $\bar{D} = n_F - n_C$ . Связь между  $\bar{D}$  и  $D$  следующая:  $D = \bar{D} (\lambda_F - \lambda_C)$ .

В данной лабораторной работе определение показателя преломления стеклянной призмы производится с помощью гониометра-спектрометра.

Гониометром называется устройство для измерения углов. Гониометр-спектрометр представляет собой очень точный прибор, предназначенный для определения различных оптических характеристик вещества, в том числе и показателя преломления.

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Гониометр-спектрометр ГС-5 состоит из следующих основных частей (рис. 3): основания 1, коллиматора 2, корпуса 3 с оптической трубой 4 и отчетным микроскопом 5, столика 6 и лимба, скрытого под корпусом.

На основании укреплен колонка коллиматора и вертикальная ось прибора, вокруг которой могут вращаться лимб, корпус и столик.

На конце коллиматора имеется щель, ширину которой можно регулировать микрометрическим винтом 7. Корпус 3 может вращаться вместе с оптической трубой относительно основания. Грубая наводка оптической трубы производится от руки.

Точная наводка осуществляется при помощи микрометрического винта, причем корпус в этом случае должен быть закреплен при помощи зажимного винта 8.

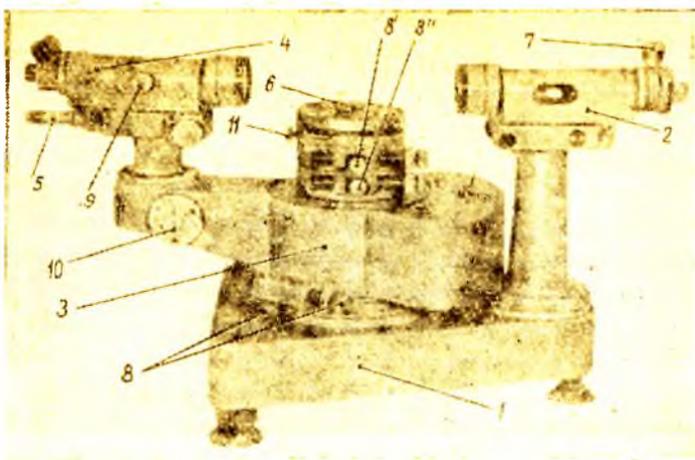


Рис. 3

Закрепление столика и поворот его осуществляются с помощью зажимных и микрометрических винтов  $8'$  и  $8''$ . Фокусировка оптической трубы и коллиматора производится с помощью винтов  $9$ , расположенных сбоку трубы и коллиматора. Винт  $11$  предназначен для измерения наклона плоскости столика. При выполнении данной работы этим винтом пользоваться не следует.

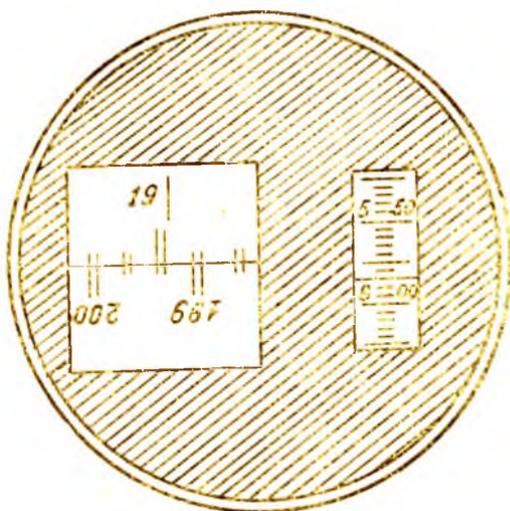


Рис. 4

Стеклоанный лимб с делениями установлен на вертикальной оси прибора в ее нижней части. Отчет по лимбу ведется через перископическую систему с помощью отчетного микроскопа 5. Лимб подсвечивается электрической лампочкой, закрепленной на основании прибора. На поверхности лимба нанесена шкала с делениями. Шкала оцифрована от 0 до  $360^\circ$ . Каждое деление, в свою очередь, разделено на три части. Цена одного деления лимба равна  $20'$ . Изображение штрихов лимба через призменный блок и объектив передается на противоположный участок лимба, а затем в оптический микрометр 5, причем одно изображение получается прямым, другое — обратным. Все отчеты производятся после того, как будут совмещены двойные деления верхней и нижней шкалы.

Совмещение штрихов лимба осуществляется с помощью маховичка (рис. 3).

В поле зрения микроскопа (рис. 4) видны изображения диаметрально противоположных участков лимба и вертикальный индекс (вертикальная неподвижная черта). Правее изображений шкал лимба в поле зрения микроскопа видны шкалы оптического микрометра и горизонтальный индекс.

Отчет производится следующим образом. Число градусов равно видимой ближайшей левой от вертикального индекса цифре (на рис. 4— $19^\circ$ ). Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхними штрихами, которым соответствует отсчитанное число градусов ( $19^\circ$ ) и нижними оцифрованными штрихами, которые отличаются от верхнего на  $180^\circ$  ( $199^\circ$ ), причем один интервал соответствует  $10'$  (на рис. 4 получается один интервал, т. е.  $10'$ ). Число единиц минут отсчитывается в правом окне по левому ряду цифр (на рис. 4—5'). Число секунд — в том же окне по правому ряду чисел и вертикальной шкале ( $57''$ ).

Положение, показанное на рис. 4, соответствует отсчету  $19^\circ 15' 57''$ .

Наличие в приборе ГС-5 стеклоанного лимба, а также возможность передачи изображения двух его диаметрально противоположных участков в один микроскоп, позволяет получить высокую точность измерения, а применение способа совмещения противоположных штрихов лимба в сочетании с оптическим микрометром резко снижает ошибку отчета по лимбу и исключает ошибку эксцентриситета лимба.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение I

#### Определение преломляющего угла призмы методом отражения

1. Освещают щель коллиматора  $K$  источником  $S$ , в качестве которого используют электрическую лампочку (рис. 5).

2. Между коллиматором и зрительной трубой  $T$  создают угол порядка  $30$ — $60^\circ$ . Измеряемую призму  $P$  устанавливают на столлик,

как показано на рис. 5. Закрепляют верхний зажимной винт столика 8' (рис. 3). Нижний затяжной винт 8'' должен быть отпущенным.

3. Наблюдая в трубу и поворачивая столик сначала от руки, а затем микрометрическим винтом 8'', совмещают изображение щели коллиматора, полученное от первой грани призмы, с нитью перекрестия сетки трубы. Видимая ширина щели должна быть в 2—3 раза больше толщины штриха сетки. Закрепив столик в этом положении и корпус с оптической трубой (с помощью зажимного винта 8), делают отсчет  $A_1$ .

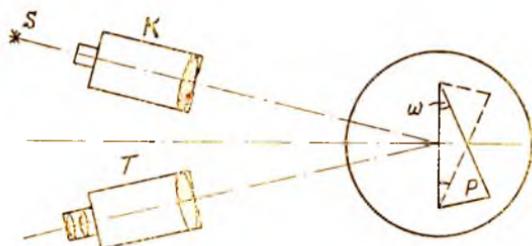


Рис. 5

4. Отпустив зажимной винт 8'', поворачивают столик до совмещения изображения щели, полученного от второй грани, с нитью перекрестия сетки трубы и делают отсчет  $A_2$ .

5. Преломляющий угол призмы  $\omega$  определяется по формулам:

$$\omega = 180^\circ - (A_1 - A_2),$$

если деления на лимбе идут, убывая от  $A_1$  к  $A_2$ , или

$$\omega = A_2 - (180^\circ + A_1),$$

если, переходя от  $A_1$  к  $A_2$ , мы перешли через нуль делений.

## Упражнение 2

### Определение угла наименьшего отклонения луча призмой

1. Зажигают гелиевую трубку ГТ перед щелью коллиматора и находят изображение щели в окуляре зрительной трубы.

2. Устанавливают на столике призму так, чтобы биссектриса преломляющего угла призмы образовала с осью коллиматора угол, близкий к прямому (рис. 6).

3. Закрепив столик винтами 8' и 8'' (рис. 3), вращают трубу к основанию призмы до тех пор, пока красная линия гелия не появится в поле зрения трубы.

4. Установив на нее перекрестье, закрепляют трубу винтом 8 и, освободив столик винтом 8', поворачивают его вместе с призмой в ту или другую сторону и наблюдают, куда движется линия, т. е. увеличивается или уменьшается отклонение. Столик с призмой следует

вращать так, чтобы спектральная линия приближалась к оси коллиматора (к положению неотклоненного луча). Пройдя некоторое расстояние, линия останавливается и затем начинает возвращаться назад. Момент остановки и соответствует углу наименьшего отклонения.

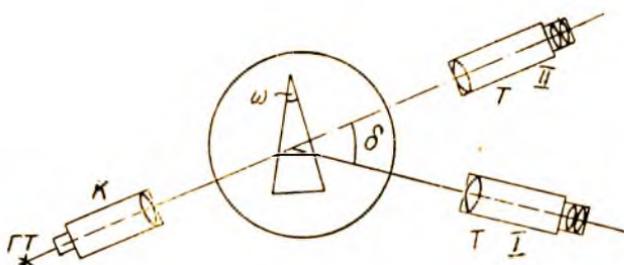


Рис. 6

5. Столик с призмой закрепляют, наводят на линию перекрестья трубы с помощью микрометрического винта  $\delta$  и делают отсчет  $A_3$ .

6. Производят таким же образом отсчет для других линий спектра гелия.

7. Сняв призму со столика, совмещают цель с перекрестьем сетки трубы и делают отсчет  $A_4$ . Разность значений  $A_3$  и  $A_4$  и будет определять угол наименьшего отклонения  $\delta$  для данных спектральных линий:

$$\delta = A_3 - A_4.$$

Таблица 1

Линия	$\lambda$ (А)	$A_1$	$A_2$	$\omega$	$\sin \frac{\omega}{2}$	$A_3$	$A_4$	$\delta$	$n$
Т. красная	7065								
Красная	6678								
Желтая	5875								
Зеленая	4921								
Голубая	4713								
Синяя	4471								
Фиолетовая	4120								

8. Строят график зависимости  $n = f(\lambda)$ , откладывая по оси абсцисс длину волны  $\lambda$ , а по оси ординат — значения  $n$ .

9. По графику определяют среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии материала, из которого сделана призма:

$$D = n_F - n_c,$$

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_c}.$$

## Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютным и относительным показателями преломления?
2. Что называется дисперсией вещества?
3. Используя среднюю дисперсию  $D$  и коэффициент дисперсии  $\gamma$ , определите марку стекла, из которого сделана призма, по таблице значений  $D$  и  $\gamma$  [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Э. Фриш. Курс общей физики, т. III, М., Физматгиздат, 1962.
  2. Физический практикум, под редакцией проф. В. Н. Пвероновой, М., Физматгиздат, 1962.
  3. Руководство к лабораторным занятиям по физике, под ред. Л. Л. Гольдина, М., изд. «Наука», 1964.
-

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЭЛЕЯ

**Принадлежности:** интерферометр ИТР-2, исследуемые растворы различной концентрации.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Физические методы определения концентрации основаны на измерении какой-либо физической величины, зависящей от концентрации определяемого компонента анализируемой смеси. Как правило, зависимость соответствующего свойства от концентрации определяют эмпирически и выражают в виде калибровочной кривой или уравнения, которыми и пользуются для определения концентрации исследуемой смеси. Большинство физических методов обладает высокой чувствительностью и точностью.

Известно, например, что показатель преломления раствора зависит от его концентрации. Следовательно, концентрацию раствора можно найти, определяя его показатель преломления. При определении малых концентраций, а также в случае, когда показатели преломления растворенного вещества и растворителя мало различаются, применяются приборы, называемые интерференционными рефрактометрами. Действие их основано на явлении дифракции света на двух параллельных щелях. Рассмотрим кратко это явление.

Если плоская монохроматическая световая волна падает нормально на непрозрачный экран  $\mathcal{E}_1$ , в котором имеются две узкие параллельные щели (рис. 1), то она будет испытывать дифракцию на каждой из них. Линза  $L$  собирает параллельные лучи от обеих щелей в одних и тех же точках экрана  $\mathcal{E}_2$ , расположенного в ее фокальной плоскости. Следовательно, дифракционные картины от каждой щели накладываются друг на друга. Кроме того, световой пу-

чок, падающий на экран  $\mathcal{E}_2$  от одной щели, интерферирует со световым пучком, падающим на него от второй щели. В результате дифракционная картина оказывается более сложной.

Полная картина, наблюдаемая на экране  $\mathcal{E}_2$ , определяется из следующих условий. Условие, определяющее положение минимумов при наличии одной щели в экране  $\mathcal{E}_1$ , сохранится и при двух щелях, ибо те направления, по которым ни одна из щелей не посылает света, не получают его и при двух. Следовательно,  $b \cdot \sin \varphi = n\lambda$ , где  $b$  — ширина щели,  $\varphi$  — угол дифракции,  $\lambda$  — длина волны,  $n=1,2,3,\dots$  (целое число), по-прежнему является условием минимума. Кроме того, возможны направления, в которых свет, посылаемый двумя щелями, взаимно ослабляется, т. е. появляются дополнительные минимумы. Это будут, очевидно, направления, которым соответствует разность хода  $\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, \dots$  для лучей, идущих от соответственных точек обеих щелей. Такие направления определяются, как видно из рис. 1, условием:

$$d \cdot \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2}, \dots$$

Наоборот, в направлениях, определяемых из условия

$$d \cdot \sin \varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

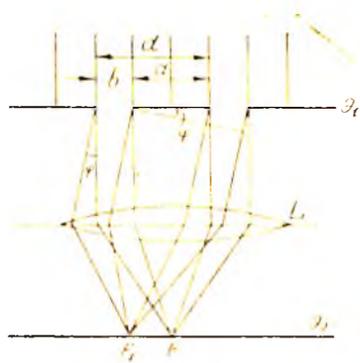


Рис. 1

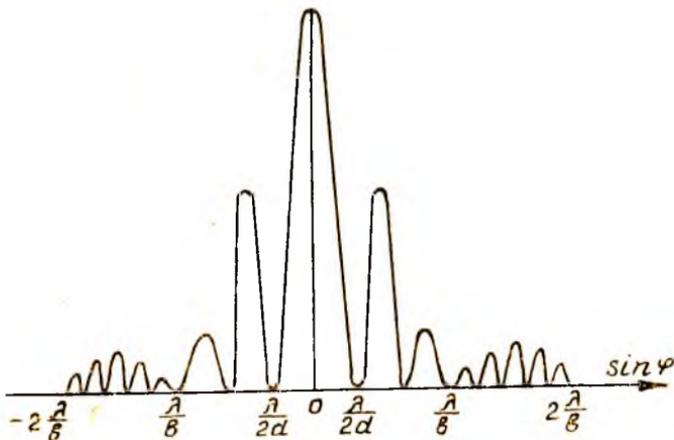


Рис. 2

действие одной щели усиливает действие другой, в результате чего получаются максимумы. Эти максимумы принято называть главными. Между двумя главными максимумами располагается один добавочный минимум.

На рис. 2 показано распределение интенсивности при дифракции света на двух параллельных щелях шириной  $b$ , расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга.

### ОБИСАНИЕ ПРИБОРА

В предлагаемой работе используется прибор ИТР-2 — интерферометр типа Рэлея. Оптическая схема прибора изображена на рис. 3 (вид сверху) и рис. 4 (вид сбоку).

Свет от источника  $S$ , с помощью конденсора  $K$  и двух зеркал  $R_1$

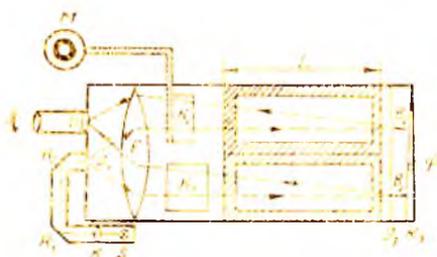


Рис. 3

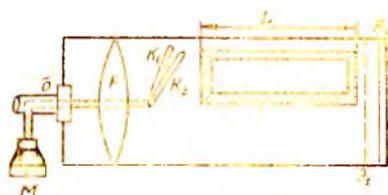


Рис. 4

и  $R_2$  собирается на узкой входной щели прибора  $S_1$ , расположенной в фокусе объектива  $F$ . Из объектива свет выходит параллельным пучком. На пути этих лучей в верхней части прибора находятся плоскопараллельные стеклянные пластинки  $K_1$  и  $K_2$ , называемые компенсаторами, и двухкамерная кювета для исследуемых веществ. Кювета расположена в термокамере. Пройдя через кювету, свет падает на плоский экран  $\mathcal{E}_1$  с двумя параллельными щелями  $B_1$  и  $B_2$ . За щелями расположено плоское зеркало  $R_3$ , отражающее лучи под очень малым углом  $\varphi$ . В обратном направлении лучи вновь проходят через щели экрана  $\mathcal{E}_1$ , кювету, компенсаторы и собираются в фокальной плоскости объектива  $F$  в точке  $O$ . В этой точке имеется сильный цилиндрический окуляр, предназначенный для наблюдения интерференционной картины.

Основное отличие короткофокусной цилиндрической линзы от обычной сферической состоит в том, что она дает сильное увеличение только в направлении, перпендикулярном оси цилиндра, и не дает увеличения в направлении оси. Так как щели имеют значительную ширину ( $5 \text{ мм}$ ), дифракционные полосы располагаются близко друг к другу. Поэтому, чтобы их видеть, необходимо сильное увеличение в направлении, перпендикулярном щелям. В то же время длина щелей достаточно велика ( $25 \text{ мм}$ ) и не требует увеличе-

С помощью интерферометра ИТР-2 можно сравнивать показатели преломления двух различных сред, например, жидкостей. Зная показатель преломления  $n_1$  одной из них (например, растворителя), можно определить показатель преломления  $n_2$  другой (например, раствора). При прохождении света через камеры кюветы между лучами, идущими от разных щелей, образуется оптическая разность хода  $\Delta$ . Если  $n_2 > n_1$ , то эта разность равна:

$$\Delta = 2L(n_2 - n_1),$$

где  $L$  — длина кюветы, а множитель 2 является следствием того, что лучи проходят через жидкость дважды. Эта оптическая разность хода приводит к смещению верхней части интерференционной картины в сторону от средней линии между щелями. В нижней части картина остается неизменной, так как она получается в результате интерференции лучей, проходящих ниже компенсаторов и кюветы. Поэтому нижняя система полос является индикатором; относительно нее наблюдается смещение верхней системы полос. Измерение смещения верхней системы полос производят с помощью компенсаторов. Пластинки компенсаторов  $K_1$  и  $K_2$  одинаковы. Одна из них —  $K_1$  свободно вращается вокруг оси, перпендикулярной щелям, изменяя свой наклон (рис. 5).

При этом изменяется длина пути луча света в стекле, чем вносится дополнительная разность хода:

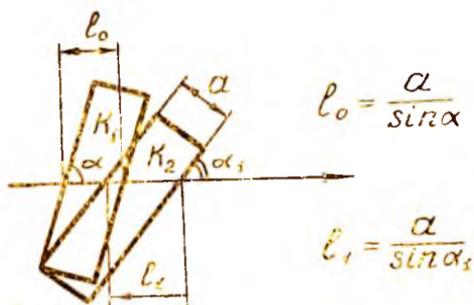


Рис. 5

$$\Delta_1 = 2n_{ст}(l_1 - l_0),$$

где  $n_{ст}$  — показатель преломления пластинок, а множитель 2 показывает, что лучи проходят через пластинки дважды. Изменяя угол  $\alpha$ , можно в широких пределах менять разность хода  $\Delta_1$  и таким образом компенсировать разность хода  $\Delta$ . При этом верхняя система полос возвращается в исходное положение. В приборе наклон пластинки осуществляется микрометрическим винтом  $M$  (рис. 3). Каждому показанию микрометра соответствует определенное значение угла поворота пластинки  $K_1$ , а следовательно, определенная оптическая разность хода  $\Delta_1$ . Если оптическая разность хода  $\Delta$  скомпенсирована, то  $\Delta = \Delta_1$ , и показания микрометра будут определяться только значениями показателя преломления  $n_2$  при постоянном  $n_1$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе предлагается определить концентрацию раствора спирта в воде. Рекомендуется придерживаться следующего порядка.

1. Ознакомиться с прибором. Затем включить осветитель и наблюдать в окуляр дифракционную картину. Если полосы в нижней части плохо видны, то, вращая окуляр, добиться хорошей видимости. Если в верхней части поля зрения полосы отсутствуют или сдвинуты относительно нижней, то вращением микрометрического винта  $M$  привести их к совмещению. При совмещении верхней системы полос с нижней показание микрометра должно быть близким к нулю.

2. Налить в термокамеру дистиллированную воду и, перемешивая ее, добиться хорошей видимости интерференционной картины.

3. Налить в обе камеры кюветы дистиллированную воду. Вращением микрометрического винта добиться совмещения верхней и нижней системы полос. Показание микрометра представляет нулевой отсчет ( $n_0$ ).

4. Заменяя воду в левой камере поочередно растворами известной концентрации, каждый раз добиваться совмещения полос и снимать соответствующие показания микрометра ( $n$ ). Показания микрометра записать в таблицу 1.

Таблица 1

№ п.п.	Концентрация $C$	Отсчет по микрометру		
		$n_0$	$n$	$n - n_0$
1				
2				

**Примечание.** При совмещении дифракционных картин неокрашенная светлая полоса в верхней части поля зрения должна приходиться над неокрашенной полосой в нижней части.

Совмещение производить не менее пяти раз и брать среднее значение из полученных отсчетов.

5. На основании полученных данных построить градуировочную кривую, откладывая по оси абсцисс концентрацию растворов  $C$ , а по оси ординат — показания микрометра ( $n - n_0$ ).

6. Заполнив левую камеру кюветы раствором неизвестной концентрации, совместить верхнюю систему полос с нижней и сделать отсчет по микрометру. Используя градуировочный график, определить искомую концентрацию.

## Контрольные вопросы

1. Объясните возникновение интерференционной картины от двух щелей.
2. Объясните принцип действия интерферометра ИТР-2.
3. Как по смещению интерференционных полос в приборе ИТР-2 можно измерить концентрацию раствора?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг. Оптика, М., Гостехиздат, 1952, § 45, 46.
  2. А. П. Захарьевский. Интерферометры, М., Оборонгиз, 1952, § 12.
  3. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, М., изд. «Наука», 1967, § 24, 25.
-

## ОГЛАВЛЕНИЕ

- Работа № 1. Определение показателя преломления стекла при помощи микроскопа . . . . .
- Работа № 2. Определение концентрации раствора при помощи рефрактометра . . . . .
- Работа № 3. Определение показателя преломления стекла линзы
- Работа № 4. Сравнение силы света двух электрических ламп накаливания и изучение светового поля одной из них с помощью фотометра Люммера-Бродхуна
- Работа № 5. Определение коэффициентов отражения и яркости светорассеивающих поверхностей
- Работа № 6. Изучение закона Малюса и определение концентрации сахара в растворе
- Работа № 8. Изучение чистоты обрабатываемой поверхности с помощью микронтерферометра
- Работа № 9. Изучение зависимости коэффициента преломления воздуха от давления с помощью интерферометра Рэлея
- Работа № 10. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки
- Работа № 11. Определение концентрации водного раствора сахара по вращению плоскости поляризации света
- Работа № 13. Снятие вольтамперной характеристики вакуумного фотоэлемента и световой характеристики фотоэлемента с запирающим слоем
- Работа № 14. Определение температуры никелевой пластинки при помощи пирометра
- Работа № 15. Определение длин световых волн методом спектрального анализа
- Работа № 17. Исследование спектров поглощения растворов с помощью фотометра
- Работа № 19. Полуколичественный анализ сплавов на алюминиевой основе
- Работа № 21. Определение максимальной энергии  $\beta$ -частиц методом поглощения
- Работа № 22. Определение длины световой волны при помощи би-призмы Френеля
- Работа № 23. Определение показателя преломления стеклянной призмы спектрометром
- Работа № 24. Определение концентрации раствора при помощи интерферометра Рэлея . . . . .

### ЗАМЕЧЕННЫЕ ОШЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
20	10 сверху	равная $1 \frac{c\theta}{\text{см}^2}$ 1 сб. 10 <sup>4</sup> шт.	равная $1 \frac{c\theta}{\text{см}^2}$ 1 сб. 10 <sup>4</sup> шт.
32	12 сверху	$E \dots H$	$E \dots H$
	21 сверху	$E$	$E$
35	1 сверху	$E_0$	$E_0$
58	24 сверху	$G$	$G$
59	Таблица	$\gamma_{m2} = \frac{n_2' + n_1'}{2}$	$\gamma_{m2} = \frac{n_2' - n_1'}{2}$
82	11 снизу	$t_{11} = 665 \cdot 10^{-7} \text{ см}$	$t_{11} = 665 \cdot 10^{-7} \text{ см}$
87	рис. 2	4072	4077