

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

И. В. Семченко, С. А. Хахомов

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОПТИКЕ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением высших учебных заведений Республики Беларусь по естественнонаучному образованию в качестве учебно-методического пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 1-31 04 01 – Физика*

Гомель 2007

УДК 535(075.8)

ББК 22.34я73

С 30

Рецензенты:

кафедра общей физики Белорусского государственного университета;

Маскевич А.А., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы

Допущено методическим Советом учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Семченко И.В.

С 30 Лабораторный практикум по оптике/И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М-во образования РБ, Гомельский государственный университет им.Ф.Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 223 с.

ISBN 985-439-220-1

Лабораторный практикум содержит описания 21 лабораторной работы по оптике. Лабораторные работы охватывают основные разделы оптики в соответствии с программой курса общей физики для студентов физических специальностей университетов. Лабораторный практикум может быть полезен студентам физических и технических специальностей вузов, преподавателям физики.

Ил. 90. Библиогр.: 26 назв.

УДК 535(075.8)

ББК 22.34я73

ISBN 985-439-220-1

© И. В. Семченко, С. А. Хахомов, 2007

© УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Это пособие представляет собой расширенное и дополненное издание трех частей сборника лабораторных работ по оптике для студентов физических специальностей университетов:

1. Стрижнев В.С., Семченко И.В., Амирова Н.Я. Лабораторные работы по оптике для студентов физических специальностей университетов. Часть I. Волновая оптика - Гомель, 1987, 44 с.
2. Стрижнев В.С., Семченко И.В., Амирова Н.Я. Лабораторные работы по оптике для студентов физических специальностей университетов. Часть II. Геометрическая и квантовая оптика - Гомель, 1987, 40 с.
3. Стрижнев В.С., Хахомов С.А. Лабораторные работы по оптике для студентов физических специальностей университетов. Часть III. Геометрическая, волновая и квантовая оптика - Гомель, 2001, 100 с.

Теперь, к большому сожалению авторского коллектива, в расширении и модернизации этой книги доцент, кандидат физико-математических наук Владимир Семенович Стрижнев (1936-2003), стоявший у истоков этой работы, уже не смог принять участие.

В своей основе сборник представляет собой лабораторный практикум по оптике. Лабораторные работы охватывают основные разделы оптики в соответствии с программой курса общей физики для студентов физических специальностей университетов.

Необходимо отметить, что при подготовке данной книги к изданию был использован опыт преподавания оптики не только в Гомельском государственном университете им. Ф.Скорины, но и в других вузах.

При написании сборника авторы исходили из следующих основных задач:

1) в руководствах к лабораторным работам кратко изложить теоретические основы рассматриваемого вопроса, чтобы дать студентам достаточно ясное представление о существе изучаемых явлений, пока соответствующий материал не изучался в ходе лекций;

2) отобрать лабораторные работы, которые охватывают основные разделы оптики в соответствии с программой курса общей физики для студентов физических специальностей университетов;

3) выбрать лабораторные работы, в которых в наибольшей степени используются приборы и оборудование, имеющиеся в вузах.

Лабораторные работы № 1, 8, 9, 10, 15, 20 уже более 15 лет выполняются в рамках физического практикума по оптике студентами специальностей «физика», «физическая электроника», «физика. техническое творчество», «автоматизированные системы обработки информации» и прошли достаточно длительную апробацию. Эти работы вошли в сборник из предыдущих изданий практически без изменений, другие работы подверглись существенной переработке и модернизации.

С точки зрения авторов данный лабораторный практикум может быть полезен студентам физических и технических специальностей вузов, преподавателям физики.

Авторы признательны Нине Яковлевне Амировой и Тамаре Миновне Адамчиковой за сотрудничество на первоначальных этапах разработки лабораторного практикума.

## 1. Погрешности в лабораторном практикуме по оптике

### 1.1. Понятие об измерении. Виды измерений

Одна из основных задач изучения физики вообще и оптики в частности, состоит в овладении методами экспериментального исследования физических процессов и явлений. Для решения этой задачи в высших учебных заведениях вводится лабораторный практикум, главная цель которого - дать студентам возможность приобрести навыки в проведении эксперимента, обработке результатов и их анализе. Каждый такой эксперимент сопровождается измерениями целого ряда различных величин.

*Измерением* называют процесс получения опытным путем числового соотношения между измеряемой величиной, характеризующей некоторый объект или явление, и некоторым ее значением, принятым за единицу измерения. *Единицей измерения* физической величины называется величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения называется *значением физической величин*.

По способу определения значения физической величины измерения делятся на *прямые* и *косвенные*.

Под *прямыми измерениями* понимают измерения, при которых значение искомой физической величины находится непосредственно из опыта с помощью специальных технических средств (мер, измерительных приборов, автоматизированных систем и др.), например, измерение длины линейкой, времени - секундомером, силы тока - амперметром.

Как правило, в результате прямого измерения имеет место взаимное влияние измеряемого объекта и средства измерения. При этом важным условием верного результата является требование отсутствия возмущения состояний объекта и средств измерения в процессе измерения. Чтобы такая неизменность объекта была гарантирована в той или иной степени, разрабатывают специальную *методику измерений*, т.е. совокупность приемов использования средств измерения, подготовки объекта к измерениям и условий измерения.

*Косвенные измерения* - это измерения, результат которых получается на основе прямых измерений ряда величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , связанных с искомой величиной  $y$  известной функциональной зависимостью

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

К косвенным измерениям прибегают в случаях, когда прямые измерения невозможны, чрезмерно сложны или не обеспечивают необходимой точности и надежности результата.

Искажения, которые получаются при любом измерении, приводят к *погрешности измерения* - отклонению результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

При измерении любой физической величины мы никогда не получаем её истинного значения. Результат измерения даст нам только приближенное значение искомой величины. Абсолютной погрешностью измерения  $\Delta x$  называется отклонение результата измерения  $x$  от истинного значения измеряемой величины  $x_0$ :

$$\Delta x = x - x_0.$$

Чтобы можно было судить, какая из физических величин измеряется более точно, вводится ещё *относительная погрешность*, которая выражается отношением абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины, т.е.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} 100\% . \quad (1)$$

## 1.2. Основные виды погрешностей измерений и их особенности

В зависимости от источников погрешностей измерения различают методические погрешности, порождаемые несовершенством методики измерения, и инструментальные, или приборные, погрешности, обусловленные несовершенством технических средств, используемых при измерении. По характеру проявления ошибки делятся на *систематические, случайные, грубые* или *промахи*.

*Систематические ошибки* - это ошибки, величина и знак которых остаются постоянными или закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины. Источниками систематических ошибок, как правило, являются упомянутые выше методические и инструментальные погрешности. Примерами методических ошибок, имеющих систематический характер, могут служить: отклонения объекта, подвергаемого измерению, от принятой идеальной модели; использование упрощающих предположений и приближенных формул при описании физических явлений и расчетах результатов косвенных измерений физических величин. Так, в учебно-исследовательских работах часто пренебрегают силами трения,

растяжения и массой нитей, сопротивлением соединительных проводов и контактов при измерениях физических величин с помощью электрических цепей. Примерами инструментальных ошибок систематического характера являются ошибки, обусловленные несовпадением исходного положения указателя с нулевой отметкой шкалы прибора; несоответствием условий эксплуатации прибора нормальным; несоответствием действительного значения меры, с помощью которой выполняются измерения, ее номинальному значению; погрешностями в изготовлении шкал приборов и др.

При выполнении измерений необходимо иметь в виду, что систематические погрешности способны существенно исказить результат измерения и не могут быть уменьшены путем увеличения числа повторных измерений. Уменьшить систематические погрешности можно путем введения поправок к результату измерения. Поправки можно вычислить в том случае, если выявлено существование систематических погрешностей, вскрыты их действительные причины, известны закономерности, определяющие их значение. Поэтому прежде, чем приступать к измерению, необходимо выяснить все возможные источники систематических погрешностей и принять меры к их устранению или определению. Разумеется, практически полностью исключить систематические ошибки невозможно.

*Случайные ошибки* - это ошибки, величина и знак которых изменяются случайно при повторных измерениях одной и той же величины. Факторы, вызывающие появление случайных ошибок, проявляются неодинаково при различных повторных измерениях. В силу случайного характера их проявления оказать на них целенаправленное воздействие невозможно. Однако с помощью теории вероятностей и методов статистики случайные погрешности измерений могут быть количественно определены и охарактеризованы в их совокупности, причем тем надежнее, чем больше число измерений одной и той же величины в серии измерений. Если при повторении измерений получаются одинаковые числовые значения, то это указывает не на отсутствие случайных погрешностей, а на недостаточную точность и чувствительность метода или средства измерений. *Грубые ошибки* или *промахи* - это погрешности измерения, значительно превышающие по величине ожидаемую при данных условиях погрешность.

## 2. Оценка погрешности прямых измерений

При проведении прямого измерения определяют наиболее вероятное значение измеряемой величины, учитывают поправки на систематическую ошибку, вычисляют случайную и приборную погрешность, погрешность округления и полную погрешность измерения.

1. Наиболее вероятное значение измеряемой величины определяется как среднее арифметическое значений, найденных при многократных наблюдениях:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Если установлена причина какой-либо систематической ошибки, то ее устраняют путем введения поправки  $\Delta x_{\text{попр}}$ . В таком случае исправленная величина

$$x_{\text{испр}} = x_{\text{изм}} + \Delta x_{\text{попр}} \quad (3)$$

Для надежной оценки случайных погрешностей необходимо провести достаточно большое количество наблюдений  $n$ . Допустим, что получены результаты  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Разность  $x_i - \langle x \rangle = \Delta x_i$  называется *случайным отклонением* результата  $i$ -го наблюдения от среднего. Отклонения  $\Delta x_i$  могут быть положительными и отрицательными, большими и малыми. При достаточно большом числе наблюдений  $n$  с вероятностью 68% отклонение  $\Delta x_i$  лежит в интервале  $[-\sigma; +\sigma]$ , где  $\sigma$  — *стандартное отклонение* (дисперсия). Для  $[-2\sigma; +2\sigma]$  эта вероятность равна 95%, а для  $[-3\sigma; +3\sigma]$  — 99,7%. Для любого значения вероятности  $P$  доверительный интервал  $[-\lambda_P \sigma; +\lambda_P \sigma]$  определяется числовым множителем  $\lambda_P$ , зависящим от  $P$ .

В теории вероятностей показывается, что *стандартное отклонение*  $\sigma$  определяется по отклонениям  $\Delta x_i = x_i - x_0$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (4)$$

Таким образом, стандартное отклонение  $\sigma$  определяют как ожидаемую ошибку каждого отдельного, единичного наблюдения. Знание величины  $\sigma$  дает возможность оценивать вероятность



получения при однократном наблюдении той или иной величины ошибки.

Величина

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} . \quad (5)$$

называется *средней квадратичной погрешностью* отдельного наблюдения.

Стандартное отклонение  $\sigma \approx S$ , и чем больше число наблюдений  $n$ , тем точнее это приближенное равенство (при  $n \rightarrow \infty$ ,  $\langle x \rangle \rightarrow x_0$ ,  $\sigma = S$ ).

Среднее арифметическое совокупности результатов наблюдений, безусловно, точнее характеризует значение измеряемой величины, чем результат только одного наблюдения, поскольку положительные и отрицательные ошибки частично компенсируются. Поэтому стандартное отклонение среднего результата  $\sigma_n$  меньше  $\sigma$ . Следовательно, средняя квадратичная погрешность окончательного результата опыта может быть представлена в виде

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} . \quad (6)$$

Тогда *полуширина доверительного интервала* равна  $\Delta x = \lambda_p S_n$ . Практически нецелесообразно (и невозможно) проводить большое число наблюдений для определения одной величины. В учебных лабораториях, как правило,  $n \sim 10$ . Это приводит к необходимости при заданной надежности расширить интервал  $\Delta x$ , т.е. увеличить множитель  $\lambda_p$ . Причем для различных значений  $n$  это увеличение будет разным. Поэтому множитель  $\lambda_p$  приходится заменить на новый  $t_{n,p}$ , называемый *коэффициентом Стьюдента* (см. табл.1). В пределе при  $n \rightarrow \infty$  коэффициент  $t_{n,p} \rightarrow t_{\infty,p} \rightarrow \lambda_p$ .

С учетом коэффициента Стьюдента случайная погрешность результата, определяющая полуширину доверительного интервала около среднего значения измеряемой величины, равна

$$\Delta x_{cl} = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} . \quad (7)$$

Это основная формула для расчета случайных погрешностей прямых измерений.

Таблица 1

Коэффициенты Стьюдента,  $t_{n,P}$ 

Число измерений, $n$	Вероятность, $P$							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0
20	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9
$\infty$	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6

Примечание. При  $n \rightarrow \infty$  приведены значения коэффициента  $\lambda_p$ .

### 3. Оценка погрешностей средств измерений

Обычно в лабораторном практикуме используются сравнительно простые средства измерений - меры и измерительные приборы. Примером мер могут служить разновесы, магазины сопротивлений или конденсаторов и др. Измерительные приборы отличаются большим разнообразием и делятся на *аналоговые* и *цифровые*. Если показания приборов являются непрерывной функцией измеряемой величины, то прибор называется *аналоговым*. Приборы с дискретным отсчетом значений измеряемой величины относятся к *цифровым*. Такие приборы имеют цифровое табло или цифровую шкалу и скачкообразно движущийся указатель.

Условно приборные погрешности средств измерений можно разделить на *основные* и *дополнительные*. *Дополнительные приборные погрешности* вызваны неисправностью прибора (например, согнутая стрелка амперметра) или отклонением от правил и условий его эксплуатации. При точном соблюдении этих правил такие погрешности практически устраняются, а при необходимости их оценку удобно приводить в виде поправок.

*Основные приборные погрешности* обусловлены допусками при изготовлении отдельных частей прибора, неравномерностью нанесения штрихов шкалы, действием сил трения между его узлами и т.п. Эти погрешности обычно не подчиняются закону нормального распределения.

Основные приборные погрешности для всех средств измерений нормируются ГОСТами и гарантируются заводом-изготовителем и службой метрологической проверки. Как правило, они приводятся в технической документации, прилагаемой к средствам измерений (паспорт, техническое описание и т.д.), а также указываются на шкале прибора. В силу этого предварительное знакомство с паспортами средств измерений перед началом лабораторного исследования весьма полезно и необходимо.

Обобщенной характеристикой погрешности ряда измерительных приборов является класс точности.

*Класс точности прибора* - это выраженное в % отношение предельной абсолютной погрешности прибора  $\Delta x_{\max}$  к максимальному значению измеряемой им величины  $x_{\max}$ :

$$k = \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Значок % на приборах не ставится. Для электроизмерительных приборов возможны классы: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,5; 4,0. Более грубые приборы класса не имеют.

При оценке абсолютной приборной ошибки внеклассных приборов можно использовать следующие рекомендации:

- для аналоговых приборов абсолютная погрешность принимается равной половине цены наименьшего деления шкалы;
- для цифровых приборов  $\Delta x_{np}$  принимается равной цене деления шкалы или единице счета;
- для приборов, имеющих нониусную шкалу (штангенциркуль, микрометр и др.), за приборную ошибку принимается точность, определяемая нониусом.

По известному классу точности находится предельная абсолютная погрешность прибора

$$\Delta x_{\max} = \frac{k}{100\%} x_{\max} \quad (9)$$

Обычно, когда указывается ошибка прибора  $\Delta x_{\max}$ , под этой величиной понимают половину интервала, внутри которого может быть заключена измеряемая величина с вероятностью  $P=0,997$ , при этом условно принимают, что функция ее распределения подчиняется нормальному закону. Тогда  $\Delta x_{\max} = 3\sigma$ . В учебных лабораториях ограничиваются значением  $P=0,95$ , которому соответствует приборная погрешность

$$\Delta x_{np} = \frac{2}{3} \Delta x_{\max} = \frac{2}{3} \frac{k}{100\%} x_{\max} \quad (10)$$

Для произвольной надежности  $P$  абсолютная погрешность равна

$$\Delta x_{np} \approx \frac{\lambda_P}{3} \Delta x_{\max} = \frac{\lambda_P}{3} \frac{k}{100\%} x_{\max} \quad (11)$$

где коэффициент  $\lambda_P$ , зависящий от доверительной вероятности  $P$ , определяется по приведенной таблице 1.

Когда считываем показания со шкалы приборов, то возникает систематическая ошибка, обусловленная ошибкой прибора и *ошибкой*

*округления.* Мы вынуждены округлять до целого самого мелкого деления шкалы или половины его. В случае округления считаем, что систематическая ошибка имеет равномерное распределение.

Интервал округления  $h$  может быть различным. Если отсчет снимается с точностью до целого деления, то интервал округления равен цене деления шкалы прибора; если отсчет округляется до половины деления, интервал округления равен половине цены деления и т.д.

Максимальная погрешность округления, очевидно, не превышает половины интервала округления, т.е. величины  $h/2$ .

Для доверительной вероятности  $P$  величину

$$\Delta x_{\text{окр}} = P \frac{h}{2}$$

принимают за абсолютную погрешность округления при измерении величины  $x$ .

На хороших измерительных приборах цена деления шкалы согласована с классом точности. В этом случае за общую погрешность можно взять ошибку, определенную из класса точности.

#### 4. Полная погрешность при прямом измерении

В теории вероятностей показывается, что погрешность, обусловленная несколькими независимыми причинами, определяется «квадратичным суммированием». Поскольку в учебных лабораториях, кроме поправок, вводимых в результат сразу, учитываются три погрешности: случайная  $\Delta x_{\text{сл}}$ , прибора  $\Delta x_{\text{пр}}$  и округления  $\Delta x_{\text{окр}}$ , то полная абсолютная погрешность прямого измерения может быть определена следующим образом

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2 + \Delta x_{\text{окр}}^2} \quad (12)$$

Относительная погрешность равна

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} 100\% = \sqrt{\varepsilon_{\text{сл}}^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2 + \varepsilon_{\text{окр}}^2} \quad (13)$$

При вычислении всех суммируемых погрешностей доверительная вероятность  $P$  выбирается одинаковой (как правило, принимают  $P=0,95$ ).

## 5. Порядок обработки результатов прямых измерений

Пусть в результате  $n$  измерений некоторой величины  $x$  получили значения  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , отличающиеся друг от друга из-за наличия случайных ошибок. В этом случае обработка результатов измерений проводится по следующей схеме.

1. Результат каждого прямого измерения  $x_i$  записывают в таблицу.
2. По формуле (2) вычисляют среднее арифметическое значение  $\langle x \rangle$  серии из  $n$  измерений.
3. Находят случайные отклонения  $\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$  отдельных измерений. Проверяют равенство нулю алгебраической суммы всех значений  $\Delta x_i$ .
4. Вычисляют квадраты отдельных отклонений  $\Delta x_i^2$  и их сумму 
$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2.$$
5. Согласно формуле (6), определяют среднеквадратичную ошибку  $S_n$  серии из  $n$  измерений.
6. Задают надежность  $P$  результата измерений. Обычно в работах физпрактикума полагают  $P=0,95$ .
7. Из табл. находят коэффициент Стьюдента  $t_{n,P}$  и по формуле (7) вычисляют случайную составляющую  $\Delta x_{сл}$  погрешности измерений.
8. Определяют приборную ошибку  $\Delta x_{пр}$  измерения величины  $x$ . Если известен класс точности прибора, то её вычисляют по формуле (11).
9. Находят погрешность округления  $\Delta x_{окр}$ .
10. По формуле (12) находят полную абсолютную погрешность  $\Delta x$  измерения величины  $x$ .
11. Вычисляют относительную погрешность измерения по формуле (13).
12. Записывают окончательный результат измерений в виде

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x; \varepsilon = \dots; P = \dots$$

Результаты вычислений по приведенной схеме удобно представить в виде табл.2. Смысл значений, заносимых в соответствующие клетки табл.2, ясен из приведенных обозначений.

Таблица 2.

Схема записи обработки результатов измерений величины  $x$

№ п/п	$x_i$	$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$	$\Delta x_i^2$	$S_n$	$\Delta x_{\text{сл}}$	$\Delta x_{\text{пр}}$	$\Delta x_{\text{окр}}$	$\langle x \rangle \pm \Delta x$
1	$x_1$	$\Delta x_1$	$\Delta x_1^2$					
2	$x_2$	$\Delta x_2$	$\Delta x_2^2$					
·	·	·	·	...	...	...	...	...
i	$x_i$	$\Delta x_i$	$\Delta x_i^2$					
·	·	·	·					
n	$x_n$	$\Delta x_n$	$\Delta x_n^2$					
n=	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$	$\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 =$	$t_{n,P}$	$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2 + \Delta x_{\text{окр}}^2}$			$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\%$

## 6. Оценка погрешностей косвенных измерений

### 6.1. Ошибки косвенных измерений

В работах физического практикума приходится выполнять не только прямые, но и косвенные измерения. При косвенных измерениях интересующая нас физическая величина  $y$  определяется как некоторая функция других величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , найденных путем прямых измерений

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (14)$$

Будем считать, что необходимые прямые измерения выполнены с одинаковой надежностью  $P$  и их результаты  $x_1 = \langle x_1 \rangle \pm \Delta x_1$ ,  $x_2 = \langle x_2 \rangle \pm \Delta x_2$ , ...  $x_n = \langle x_n \rangle \pm \Delta x_n$  известны. Обычно предполагается, что все аргументы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  являются независимыми и измеряются независимыми способами. Наиболее вероятное значение функции  $y$  при таких измерениях получается при подстановке средних значений аргументов:

$$y_{\text{изм}} = f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle),$$

где  $\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle$  – средние арифметические значения результатов прямых измерений.

Погрешность величины  $y_{изм}$  определяют по формуле

$$\Delta y_{изм} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (15)$$

где  $\Delta x_i$  – абсолютные погрешности величин  $x_i$ ,  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  – частные производные функции  $y$  по аргументам  $x_i$ , вычисленные при средних значениях  $\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle$ . Доверительная вероятность  $P$  для всех погрешностей  $\Delta x$  задается одинаковой, обычно равной 0,95. Такой же она будет и для величины  $\Delta y$ .

Относительную погрешность определяют по формуле:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{y} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

В частном случае, если аргументы  $\Delta x_i$  входят в функцию в виде сомножителей, вычисления проще начинать с определения относительной погрешности  $\varepsilon_y$ . Абсолютную погрешность в таком случае определяют по относительной погрешности:

$$\Delta y = \varepsilon_y y$$

Погрешность косвенного измерения величины  $y$  зависит от погрешностей всех прямоизмеренных величин, входящих в уравнение связи (14), а также от погрешности вычислений. Общие правила вычисления погрешности могут быть выведены с помощью дифференциального исчисления. Однако полученные при этом соотношения в силу произвольного вида функциональной зависимости (14) являются сравнительно громоздкими и оказываются не всегда удобными при их практическом использовании в учебной лаборатории.

## 6.2. Порядок выполнения и обработки результатов косвенных измерений

При выполнении косвенных измерений и обработке их результатов удобно придерживаться следующей схемы.



1. Выяснить, от каких величин  $x_1, x_2 \dots, x_n$ , подлежащих прямым измерениям, зависит косвенно измеряемая величина  $y$ .
2. Установить, какие из величин  $x_1, x_2 \dots, x_n$  являются независимыми, а какие – нет.
3. Для каждой серии измеряемых величин, входящих в определение искомой величины, проводится обработка, как описано в п. 5. При этом для всех измеряемых величин задается одно и то же значение доверительной вероятности (0,95).
4. Находится выражение для абсолютной погрешности по формуле (15) в соответствии с конкретным видом функциональной зависимости.
5. Окончательный результат записывается в виде  $y_{изм} = f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle)$
6. Определяется относительная погрешность

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} 100\% . \quad (16)$$

## **7. Графические методы представления результатов измерений. Требования, предъявляемые к графикам**

Представление результатов измерений в виде графиков отличается простотой и наглядностью и позволяет решать разнообразные задачи. Во-первых, графики дают возможность выявить характер функциональной зависимости между величинами и установить эмпирическое соотношение, связывающее их. Во-вторых, графики позволяют более наглядно проводить сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой. Построение графиков непосредственно во время работы в лаборатории помогает следить за ходом зависимости и избегать грубых ошибок.

При оформлении графического материала в учебной лаборатории необходимо придерживаться следующих требований:

- графики должны выполняться на миллиметровой бумаге;
- по горизонтальной оси принято откладывать независимую переменную, т.е. величину, значение которой задает сам экспериментатор, а по вертикальной - величину, которую он при этом определяет;
- координатные оси вычерчиваются сплошными линиями. Стрелок на концах координатных осей не ставят;
- по осям координат должны быть указаны условные обозначения и размерности отложенных величин в принятых сокращениях;

- пересечение координатных осей не обязательно должно совпадать с нулевыми значениями  $x$  и  $y$ . При выборе начала координат следует стремиться максимально использовать всю площадь чертежа;
- график должен быть достаточно точным. Наименьшее расстояние, которое можно отсчитать по графику, должно быть не меньше величины абсолютной погрешности выполненных измерений;
- масштаб графика следует выбирать простым. Числовые значения масштаба шкал осей координат пишут за пределами графика (левее оси ординат и ниже оси абсцисс);
- экспериментальные точки на графике следует отмечать хорошо выделяющимися знаками (кружочками, крестиками и т.д.), с помощью которых необходимо провести "наилучшую" плавную кривую, а не ломаную линию (эта кривая должна быть по возможности плавной и проходить таким образом, чтобы примерно одинаковое число точек находилось бы над кривой и под ней. При проведении кривой выявляется некоторый разброс точек, обусловленный наличием ошибок измерений. Чем меньше ошибки измерений, тем лучше точки ложатся на кривую. При этом отдельные грубые просчеты и явно ошибочные измерения легко обнаружить, так как соответствующие им точки будут расположены далеко от кривой. Примерный вид графиков приведен на рис 1, 2.);
- для раскрытия содержания график сопровождается подписью.

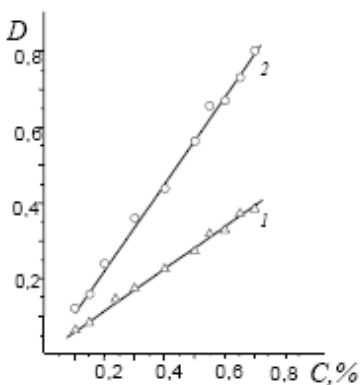


Рис.1 Пример построения графика зависимости оптической силы от концентрации раствора, измеренной в кювете толщиной 20 мм (1) и 40мм (2)

При исследовании угловых зависимостей каких-либо величин удобнее пользоваться не декартовой (прямоугольной), а полярной системой координат. В качестве примера рассмотрим построение зависимости интенсивности

прошедшего сквозь поляризатор и анализатор света от угла поворота анализатора при изучении явления поляризации световых волн. Пусть, измеряя интенсивность света фотодатчиком, мы получили ряд значений силы фототока для различных углов поворота анализатора:

$\varphi$ , град	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
I, мкА	150	148	132	114	90	61	37	16	5	1

Полученные значения силы тока следует нормировать на единицу, т.е. принять максимальное значение силы тока (150 мкА) за единицу, а остальные значения представить в долях единицы. Тогда мы с учетом округления получим:

$\varphi$ , град	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
I, отн. ед.	1	0,99	0,88	0,76	0,60	0,41	0,25	0,11	0,03	0,01

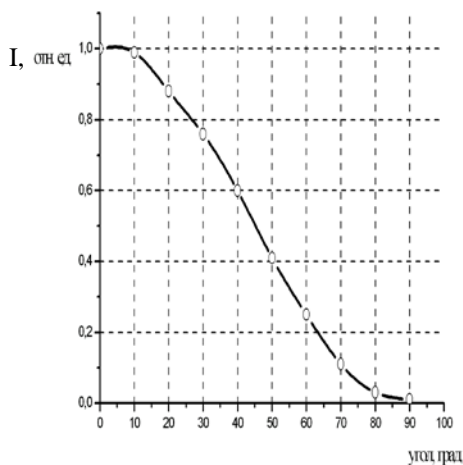


Рис.2 Пример построения графика зависимости интенсивности прошедшего сквозь поляризатор и анализатор света от угла поворота анализатора в декартовой системе координат.

Построив на миллиметровой бумаге полярную сетку единичного радиуса и нанеся на нее экспериментальные точки, мы получим требуемый график (см. рис.3).

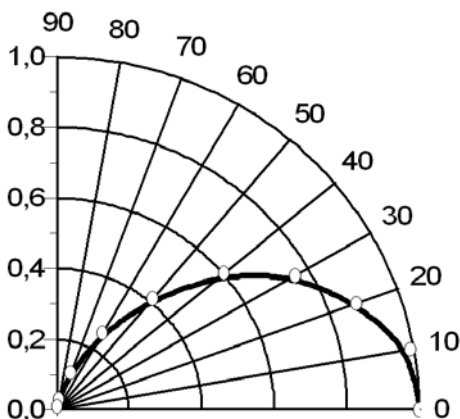


Рис.3. Пример построения графика в полярных координатах

## 8. Округление и запись результатов измерений

При выполнении вычислений в лабораторном практикуме абсолютная погрешность округляется до одной значащей цифры; при этом округления производят с избытком. Однако если первой значащей цифрой является единица, то при округлении приводят две значащие цифры.

Например,  $\Delta f = 0,053 \text{ м} \approx 0,06 \text{ м}$ ;  $\Delta \lambda = 12,4 \text{ нм} \approx 13 \text{ нм}$ . Это правило округления распространяется и на относительные погрешности.

При записи результатов измерений необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Результат измерения величины необходимо записывать вместе с его погрешностью и доверительной вероятностью.

Например,  $\lambda = (635 \pm 8) \text{ нм}$ ,  $P=0,95$ .

2. Конечный результат округляется так, чтобы его последняя цифра и значащая цифра абсолютной погрешности принадлежали к одному и тому же разряду.
3. Если в ответе имеется множитель  $10^n$ , то показатель степени  $n$  в результате и его абсолютной погрешности должен быть одинаковым. Например,  $h=(2,1\pm 0,2)\cdot 10^2$  мм.
4. Измеряемая величина и абсолютная погрешность выражаются в одних единицах измерений.

## **9. Выполнение работ физпрактикума и оформление отчетов**

### **9.1. Подготовка к работе и ее выполнение**

Самостоятельная работа студентов при подготовке к занятиям физического практикума может быть разделена на три этапа:

- теоретическая подготовка;
- знакомство с конструкцией установки и определение ее погрешности;
- составление плана работы и подготовка таблиц для записи результатов наблюдений.

На первом этапе студенты изучают по рекомендуемой литературе сущность тех явлений, которые будут исследоваться экспериментально, а также теоретические обоснования методов измерений и исследований.

На втором этапе (в лаборатории) изучается конструкция предложенной установки, ее характеристики по прилагаемой технической документации, выявляются факторы, влияющие на точность измерений, приблизительно определяется относительная погрешность установки и на этой основе выбирается целесообразная точность измерений отдельных физических величин.

Завершением подготовки (и показателем ее эффективности) является составление плана эксперимента. План представляет собой по существу анализ поставленной экспериментальной задачи, т.е. расчленение ее на ряд отдельных этапов. При составлении плана выясняется, какие величины измеряются прямо и какие - косвенно, вычерчиваются таблицы для записи результатов наблюдений, а также результатов измерений и их погрешностей.

На занятиях весь этот материал предъявляется преподавателю, который путем собеседования выявляет степень подготовленности студента к выполнению работы и решает вопрос о допуске к ней.

Получив допуск, студент проводит эксперимент, выполняет необходимые вычисления, строит графики, анализирует их, делает необходимые выводы и предъявляет результаты преподавателю.

## 9.2. Составление отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы физического практикума должен содержать:

- 1) название и цель работы;
- 2) перечень приборов и принадлежностей с указанием их технических характеристик;
- 3) необходимые расчетные формулы для искомых величин и погрешностей с пояснением обозначений;
- 4) план эксперимента (предварительную оценку погрешностей измерений);
- 5) ход выполнения работы с расчленением на отдельные упражнения (здесь приводятся таблицы с результатами наблюдений и вычислений, графики, а также необходимые расчеты);
- 6) окончательные результаты измерений и выводы;
- 7) замечания по работе установки и предложения по ее совершенствованию, если они возникли в процессе выполнения работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ФОТОМЕТРИИ

Цель работы: ознакомить студентов с основными фотометрическими понятиями, величинами и экспериментально проверить зависимость освещенности от различных параметров.

Приборы и принадлежности: фотометрический прибор на основе селенового фотоэлемента, осветитель, набор диафрагм, матовое стекло, линза, микроамперметр, выпрямитель, соединительные провода.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Фотометрия сводится к измерению энергии, приносимой световой волной, или к измерению величин, так или иначе связанных с этой энергетической характеристикой. Для прикладной светотехники важна как объективная энергетическая характеристика света, так и мера воздействия света на глаз наблюдателя. Поэтому в фотометрии приходится вводить двойные единицы измерения: энергетические (оцениваемые по объективным энергетическим характеристикам) и фотометрические (оцениваемые по воздействию на глаз). Энергетические и фотометрические величины взаимосвязаны. Основной фотометрической единицей является кандела. Кандела (кд) – есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/стер.

На основе канделы определяются все другие фотометрические величины.

Рассмотрим точечный источник, сила света которого равна  $I$ , и выделим телесный угол  $d\Omega$  с вершиной в точке нахождения источника (рис. 1.1).

Величина

$$d\Phi = Id\Omega \quad (1.1)$$

называется элементарным световым потоком, излучаемым в пространство, ограниченное телесным углом  $d\Omega$ . Единицей светового потока является люмен ( $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ стер}$ ). Если сила света источника не зависит от направления наблюдения (такой источник называется изотропным), то полный световой поток, излучаемый источником по всем направлениям, равен

$$\Phi = 4\pi I \quad (1.2)$$

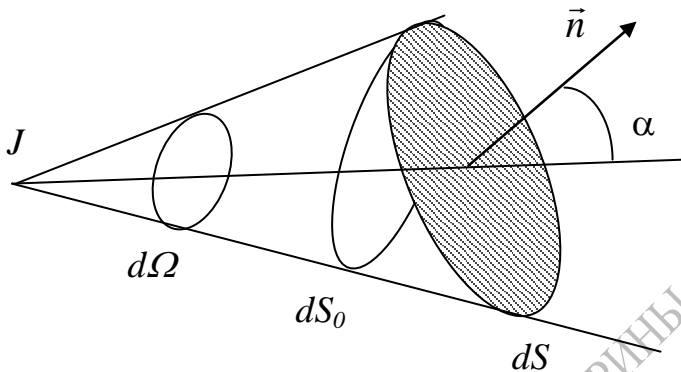


Рис. 1.1.

На пути светового потока расположим элементарную площадку  $dS$ , нормаль к которой  $\vec{n}$  образует угол  $\alpha$  с направлением распространения света. Отношение светового потока к площади освещаемой поверхности

$$E = d\Phi/dS \quad (1.3)$$

называется освещенностью, которая измеряется в люксах ( $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1 \text{ м}^2$ ).

Построим также площадку  $dS_0$ , перпендикулярную к направлению наблюдения и находящуюся на том же расстоянии  $r$  от источника света, что и площадка  $dS$ . Учитывая, что

$$dS_0 = r^2 d\Omega = dS \cos\alpha \quad (1.4)$$

и используя соотношение (1.1), из формулы (1.3) получаем

$$E = I \cos\alpha / r^2. \quad (1.5)$$

Таким образом, освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника света (закон обратных квадратов) и прямо пропорциональна косинусу угла падения света на поверхность (закон косинусов).

Если источником света является некоторая поверхность, то для ее характеристики вводятся такие величины, как светимость и яркость.

Пусть площадка  $dS$  (рис. 1.1) излучает свет. Тогда светимость можно определить как световой поток, испускаемый с единицы площади:

$$R = d\Phi / dS. \quad (1.6)$$

В свою очередь под яркостью понимают силу света, испускаемого с единицы видимой поверхности в данном направлении:

$$B = dI / dS \cos\alpha \quad (1.7)$$



Из формулы (1.7) можно увидеть, что яркость источника  $B$  может зависеть от угла  $\alpha$ . Однако существуют источники света, для которых яркость не зависит от направления наблюдения, т.е.  $B(\alpha) = const$ . Такие источники называются ламбертовыми, для них соблюдается закон Ламберта: сила света любой элементарной площадки на его поверхности прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к площадке и направлением наблюдения, т.е.

$$I = I_0 \cos \alpha \quad (1.8)$$

и для них справедливо соотношение

$$R = \pi B \quad (1.9)$$

Если свечение поверхности обусловлено освещением ее внешним источником, то светимость связана с освещенностью соотношением

$$R = \rho E \quad (1.10)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения поверхности.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Фотометрический прибор состоит из камеры и разъемного корпуса прямоугольной формы 4, 5.

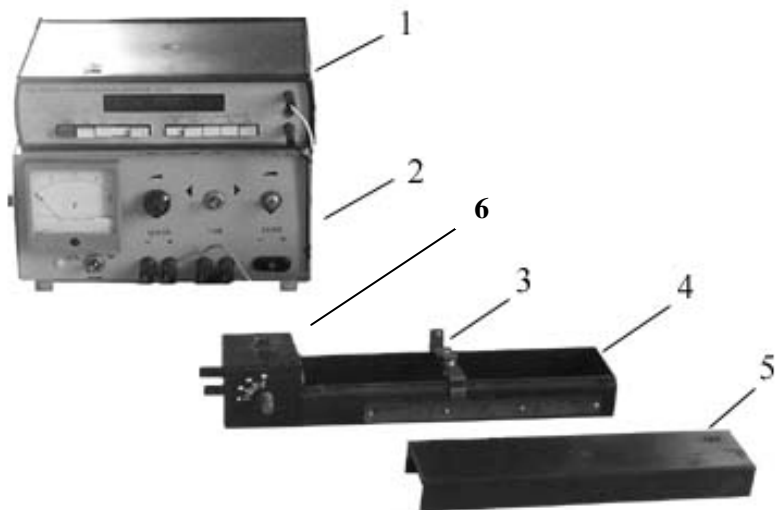


Рис.1.2.

Внутри камеры вмонтирован селеновый фотоэлемент 6, провода от которого выведены на торцевую часть прибора. Фотоэлемент закреплен в специальной оправе, которая может поворачиваться вокруг горизонтальной оси в пределах угла  $\theta = 90^\circ$ . Отсчет угла поворота осуществляется по угловой шкале, расположенной на лицевой стороне камеры. Селеновый фотоэлемент состоит из металлической подложки, на одной стороне которой нанесен слой селена толщиной около 0,1 мм. Сверху этот слой покрыт прозрачным электродом. Согласно первому закону фотоэффекта, сила фототока насыщения пропорциональна падающему световому потоку:

$$i = \gamma \Phi \quad (1.11)$$

где  $\gamma$  – интегральная чувствительность фотоэлемента.

Селеновый фотоэлемент имеет спектральную характеристику чувствительности, близкую к кривой видимости человеческого глаза. Это позволяет использовать фотоэлемент для фотометрирования дневного света.

Внутри прямоугольного корпуса помещается осветитель с электролампочкой 3, который может перемещаться вдоль продольной оси прибора. Величина перемещения отсчитывается по линейке, закрепленной на лицевой стороне прибора. В набор также входят линзы в оправе, матовое стекло, набор диафрагм, исследуемая электролампочка, реостат. Питание электролампочек осуществляется от выпрямителя 2 типа ВС-24. Величина фототока измеряется с помощью универсального цифрового прибора 1 типа 4323А.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Подключить микроамперметр к зажимам фотоэлемента. Установить предел измерений – 50 мкА.
2. Лампочку осветителя соединить последовательно с реостатом и выпрямителем.
3. Установить фотоэлемент перпендикулярно оси прибора (ручку – на нулевую отметку угловой шкалы).

## УПРАЖНЕНИЕ I

### Исследование зависимости освещенности от расстояния до источника света

1. Установить осветитель на расстоянии 10 см от фотоэлемента.
2. С помощью реостата подать на лампу такое напряжение, при котором микроампер покажет максимальное значение силы тока.

3. Снять отсчет  $i_{10}$  по шкале микроамперметра.
4. Не меняя напряжения, установить лампу на расстояниях 20 см и 30 см от фотоэлемента и снять отсчеты  $i_{20}$  и  $i_{30}$ .
5. Используя полученные данные, проверить справедливость закона обратных квадратов, т.е.

$$i_{10}/i_{20} = r_{20}^2/r_{10}^2; \quad i_{10}/i_{30} = r_{30}^2/r_{10}^2$$

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение силы света неизвестного источника

1. Подать на лампочку напряжение 3,5 В (мощность лампочки 0,96 Вт), установить ее на расстоянии  $r_1 = 0,25$  м от фотоэлемента и снять по микроамперметру отсчет  $i_1$ .
2. Заменить эталонную лампочку на другую с напряжением питания 6,3 В и, изменяя расстояние между источником света и фотоэлементом, найти такое положение  $r_2$ , при котором микроамперметр покажет прежнее значение силы тока  $i_1$ .
3. Используя соотношение

$$I_1/I_2 = r_2^2/r_1^2,$$

вычислить силу света  $I_2$  неизвестного источника.

4. Провести аналогичные измерения для электролампочки с напряжением 2,5 В и вычислить силу света третьего источника ( $I_3$ ).

## УПРАЖНЕНИЕ III

### Исследование зависимости освещенности от угла падения света

1. Установить фотоэлемент на нулевое деление угловой шкалы прибора.
2. Для получения параллельного пучка света на расстоянии от источника, равном фокусному расстоянию используемой линзы, установить линзу в оправе.
3. С помощью реостата добиться максимального значения фототока и снять отсчет  $i_0$ .
4. Не меняя напряжения на лампе и расстояния  $r$ , повернуть фотоэлемент на  $30^\circ$  и  $45^\circ$  и снять отсчеты  $i_{30}$  и  $i_{45}$  по шкале микроамперметра.

$$i_0/i_{30} = \cos 0^\circ/\cos 30^\circ; \quad i_0/i_{45} = \cos 0^\circ/\cos 45^\circ$$

5. Используя полученные данные, проверить справедливость закона косинусов.

#### УПРАЖНЕНИЕ IV

##### Исследование зависимости светового потока от площади освещенной поверхности

1. Убрать линзу и повернуть фотоэлемент перпендикулярно падающему свету.
2. Установить лампочку и фотоэлемент на расстоянии  $r = 10$  см друг от друга, поместить между ними матовое стекло в оправе (при этом площадь открытой поверхности фотоэлемента равна  $9 \text{ см}^2$ ). Снять величину фототока  $i_0$  по шкале микроамперметра.
3. Установить перед фотоэлементом последовательно диафрагмы с площадью  $6 \text{ см}^2$  и  $3 \text{ см}^2$  и снять соответственно показания микроамперметра  $i_6$  и  $i_3$ .
4. Построить график функции  $i = f(S)$  и убедиться в линейной зависимости светового потока от площади поверхности при постоянной освещенности.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем разница между энергетическими и фотометрическими величинами?
2. Основные фотометрические величины и единицы их измерения.
3. Закон обратных квадратов, закон косинусов.
4. Какие источники света называются ламбертовскими?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ЛИНЗ ПО МЕТОДУ БЕССЕЛЯ И С ПОМОЩЬЮ КОЛЛИМАЦИОННОЙ ТРУБЫ

Цель работы: научить студентов определять фокусные расстояния линз и оптических систем.

Приборы и принадлежности: оптический рельс с измерительной линейкой, наборы линз, рейтор, лампа подсветки с проецируемым предметом, экран, коллимационная труба, линза, установленная на суппорте, измерительный микроскоп со сменными окулярами, мира, съёмная щель.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Прозрачное тело, образованное пересечением сферических поверхностей, называют сферической линзой. Если толщина линзы намного меньше радиусов кривизны сферических поверхностей, то линза называется тонкой.

Система сферических поверхностей называется центрированной, если центры кривизны всех поверхностей лежат на одной прямой, которая называется главной оптической осью системы. Фокусом сферической поверхности называется точка, в которой сходятся после преломления параллельные лучи (т.е. лучи, идущие из бесконечно удаленной точки). Точка, в которой пересекается пучок световых лучей, распространяющихся параллельно главной оптической оси, после прохождения линзы, называется главным фокусом линзы.

Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса называют главным фокусным расстоянием линзы. Фокусное расстояние является одной из основных характеристик линзы. Для тонкой линзы теория даёт формулу для нахождения фокусного расстояния линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \quad (2.1)$$

где  $d$  – расстояние от предмета до оптического центра линзы;  $f$  – расстояние от оптического центра линзы до изображения;  $F$  – фокусное расстояние линзы.

Величина  $D = \frac{1}{F}$  называется оптической силой линзы.

Оптическая сила измеряется в диоптриях. Одна диоптрия – это оптическая сила такой линзы, у которой фокусное расстояние равно 1м.

Если известны радиусы кривизны линзы  $R_1$  и  $R_2$  и показатель преломления вещества, из которого она изготовлена, то её фокусное расстояние равно:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.2)$$

В современной оптике отдельные линзы собирают в оптические системы. Системы, у которых оптические центры всех линз расположены на одной прямой, как указывалось выше, называются центрированными. Простейшей оптической системой называется система, состоящая из двух линз, сложенных вплотную. Для такой системы оптическая сила  $D$  равна:

$$D = D_1 + D_2 \quad (2.3)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – оптические силы линз, входящих в систему. Или

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} \quad (2.4)$$

Определение фокусных расстояний линз по формуле (2.1) затруднено, так как расстояния  $d$  и  $f$  отсчитываются от оптического центра линзы, лежащего внутри линзы. Существует ряд косвенных методов определения фокусного расстояния линз и оптических систем.

Одним из наиболее точных методов определения фокусных расстояний является метод Бесселя, заключающийся в следующем: на оптической скамье помещают предмет  $S$  и экран, на котором получается изображение  $S'$ , даваемое линзой, расположенной между предметом и экраном (рис. 2.1).

Если расстояние  $L$  от предмета до экрана достаточно велико и превышает учетверённое значение фокусного расстояния  $F$ , то, перемещая линзу вдоль оптической оси, можно найти два таких положения линзы, при которых на экране наблюдаются чёткое увеличенное и уменьшенное изображения предмета.

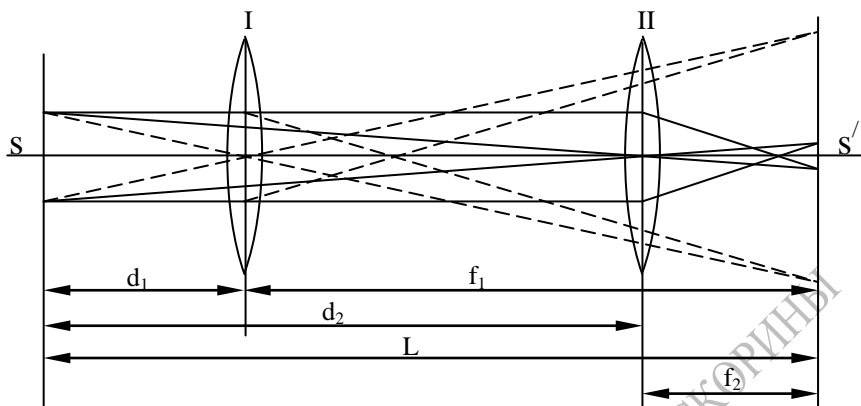


Рис. 2.1.

Обозначим через  $d_1$  и  $f_1$  расстояние от линзы до предмета и от линзы до изображения при увеличенном изображении предмета и через  $d_2$  и  $f_2$  те же величины при уменьшенном его изображении (рис.2.1). Тогда имеем (см.рис.2.1):

$$d_1 + f_1 = d_2 + f_2 = L. \quad (2.5)$$

Запишем формулу (2.1) для увеличенного и уменьшенного изображений:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F} \quad \text{и} \quad \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F}.$$

Откуда  $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}$ , или  $\frac{f_1 + d_1}{f_1 d_1} = \frac{f_2 + d_2}{f_2 d_2}$ .

Так как  $f_1 + d_1 = L$  и  $f_2 + d_2 = L$ , то

$$\frac{L}{f_1 d_1} = \frac{L}{f_2 d_2}. \quad (2.6)$$

Из равенства (2.6) следует, что

$$f_1 d_1 = f_2 d_2. \quad (2.7)$$

Равенства (2.5) и (2.7) одновременно выполняются только при условии, что

$$d_1 = f_2 \quad \text{и} \quad d_2 = f_1. \quad (2.8)$$

Обозначив расстояние между двумя положениями линзы, дающей увеличенное и уменьшенное изображение предмета через  $l$ , на основании (2.8) и рис. 2.1 получим:

$$d_1 = \frac{L-l}{2}; \quad f_1 = \frac{L+l}{2}; \quad d_2 = \frac{L+l}{2}; \quad f_2 = \frac{L-l}{2}. \quad (2.9)$$

Подставляя (2.9) в (2.1) для каждого положения линзы 1 и 2, имеем:

$$\frac{2}{L-l} + \frac{2}{L+l} = \frac{1}{F}. \quad (2.10)$$

Отсюда фокусное расстояние  $F$  выразится зависимостью:

$$F = \frac{(L-l)(L+l)}{4L}. \quad (2.11)$$

В соотношение (2.11) входят только величины  $L$  и  $l$ , равные расстоянию от предмета до экрана, и расстояния между двумя положениями линзы, легко измеряемые с достаточно большой степенью точности, и не входят отрезки, измеряемые от оптического центра линзы или главных плоскостей, определение положений которых довольно затруднительно.

Описанный способ является принципиально наиболее общим и пригодным как для толстых, так и для тонких линз.

Когда в предыдущих случаях мы пользовались для расчетов величинами  $d$  и  $f$ , то подразумевали отрезки, измеренные до центра линзы; на самом же деле следовало эти величины измерять от соответствующих главных плоскостей линзы, определение положения которых довольно затруднительно.

Общую теорию оптических систем разработал Гаусс (1841 г.). Теория Гаусса есть теория идеальной оптической системы, или системы, в которой сохраняется гомоцентричность пучков (это значит, что каждая сходящаяся точка источника рассматривается как вершина расходящегося пучка лучей, именуемого гомоцентрическим, т.е. имеющим общий центр). Если после отражения и преломления этот пучок превращается в пучок, сходящийся также в одну точку, то последний также является гомоцентрическим, и центр его представляет собой изображение светящейся точки. При сохранении гомоцентричности каждая точка источника дает одну точку изображения. Такие изображения называются стигматическими. В силу обратимости световых лучей изображение можно рассматривать как источник, а источник – как изображение. Поэтому при стигматическом изображении центры наших пучков называются сопряженными точками той оптической системы, в которой



происходит преобразование расходящегося гомоцентрического пучка в сходящийся. Соответственные лучи и пучки также называются сопряженными.

Рассмотрим луч  $A_2B_2$ , входящий в систему справа и лежащий на продолжении луча  $A_1B_1$  (рис.2.1а). Слева из системы выйдет луч  $C_1D_1$ , сопряжённый лучу  $A_2B_2$ . Точку  $F_1$  называют *передним фокусом* системы (фокусом в пространстве предметов). Исходящие из него лучи в пространстве изображений параллельны оптической оси. Продолжим теперь  $C_1D_1$  и  $C_2D_2$ , до пересечения с продолжениями  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$  и отметим точки пересечения  $R_1$  и  $R_2$ . Легко видеть, что эти точки сопряжены, т.е. являются изображением друг друга. Действительно, точка  $R_1$  лежит на пересечении лучей  $A_1B_1$  и  $C_1D_1$ , а точка  $R_2$  — на пересечении сопряжённых им лучей  $A_2B_2$  и  $C_2D_2$  (для большей наглядности направление одной пары сопряжённых лучей, например,  $A_2B_2$  и  $C_1D_1$ , можно изменить на противоположное, пользуясь обратимостью световых лучей).

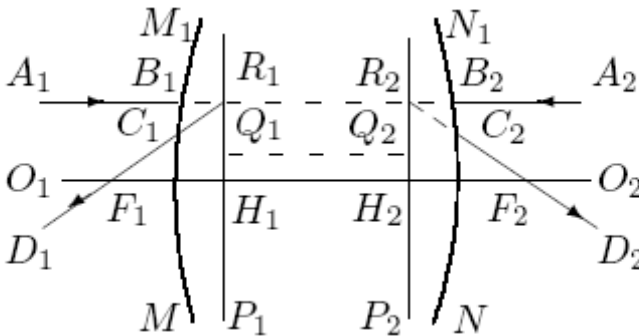


Рис. 2.1а.

Из построения ясно, что точки  $R_1$  и  $R_2$  лежат на одинаковом расстоянии от главной оптической оси, т.е.  $R_1 H_1 = R_2 H_2$  (поперечное увеличение равно +1).

Можно показать, что в идеальной системе все точки плоскости  $P_1$ , перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через  $R_1$ , попарно сопряжены точкам плоскости  $P_2$ , также перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через  $R_2$ . При этом сопряжённые точки находятся на одинаковых расстояниях от оси (например,

точки  $Q_1$  и  $Q_2$ ). Плоскости  $P_1$  и  $P_2$  называются *главными плоскостями*, а точки  $H_1$  и  $H_2$  — *главными точками* системы. Расстояния от главных точек до фокусов называются *фокусными расстояниями*:  $F = H_1F_1$ ,  $F' = H_2F_2$ . В том случае, когда с обеих сторон системы находится одна и та же среда (например, воздух),  $F = F'$ .

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для определения фокусных расстояний линз состоит из двух частей. Одна из них состоит из осветителя 3 с изображаемым предметом (светящейся стрелкой), экрана 1, рейтера с закреплёнными линзами 2 и предназначена для проведения исследований по методу Бесселя (рис.2.2.а.)

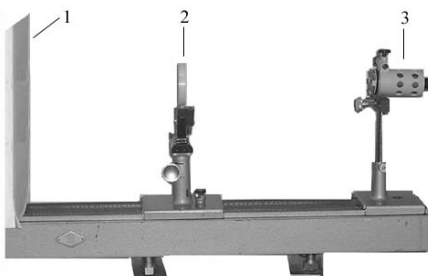


Рис.2.2.а

Вторая часть состоит из оптического рельса 1 с измерительной линейкой, на котором установлен длиннофокусный коллиматор 2 с мирой 3 или автоколлимационным окуляром со шкалой (рис. 2.2.б).

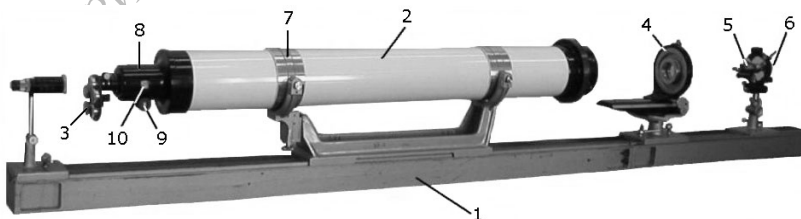


Рис.2.2.б

Подсветка миры или шкалы производится осветителем с лампочкой, питаемый от трансформатора. Испытуемые линзы или

системы линз закрепляются в суппорте 4 с вращающейся универсальной оправой или на рейтере в специальном держателе. Наблюдение поверхности линз или изображений предметов осуществляют с помощью микроскопа 5 с винтовым окулярным микрометром, который размещают на оптическом рельсе. Микроскоп предусматривает смену окуляров 6.

Объектив коллиматора состоит из двух линз, закреплённых в оправе с помощью пружинного кольца. Такая конструкция позволяет точно выставить ось объектива параллельно оси трубы коллиматора. Механизм фокусировки коллиматора состоит из корпуса 2, привёрнутого к обойме 7, и трубы 8, перемещающейся с помощью маховика 9, который и осуществляет фокусировку коллиматора. Отсчёт производится по линейной шкале и нониусу 10.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

На оптической рельсе размещают осветитель с предметом и экран. Между ними помещают в специальном держателе в рейтере собирающую линзу №1. Включают осветитель в сеть.

### **УПРАЖНЕНИЕ I**

#### **Определение фокусного расстояния собирающей линзы**

Передвигаем линзу №1 вдоль оптического рельса и находим два таких положения, при которых на экране наблюдается резкое увеличенное и уменьшенное изображения предмета. Измеряют на скамье расстояние  $L$  от предмета до экрана и расстояние  $l$  между положениями линзы, когда на экране наблюдается увеличенное и уменьшенное изображения. По формуле (2.11) вычисляют фокусное расстояние линзы №1.

Аналогичные измерения выполняют для собирающей линзы №2 и вычисляют её фокусное расстояние.

### **УПРАЖНЕНИЕ II**

#### **Определение фокусного расстояния оптической системы**

Присоединив к собирающей линзе №1 вторую собирающую линзу №2 путём вставки в специальную оправу, повторяют измерения аналогично проведенным в упражнении 1. По формуле (2.11) вычисляют фокусное расстояние оптической системы.

Зная фокусное расстояние оптической системы, а также ранее определённое фокусное расстояние для линзы №1, по формуле (2.4) вычисляют фокусное расстояние линзы №2. Проводят сопоставление вычисленного фокусного расстояния для линзы №2 по формуле (2.4) и ранее определённого по формуле (2.11).

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Присоединив к собирающей линзе №2, фокусное расстояние которой  $F_2$  определено, рассеивающую линзу с неизвестным фокусным расстоянием  $F_3$ , собирают систему из двух плотно сложенных линз. Для такой системы выполняется соотношение:

$$\frac{1}{F_2} - \frac{1}{F_3} = \frac{1}{F}, \quad (2.12)$$

где  $F$  – фокусное расстояние системы линз с  $F_2$  и  $F_3$ .

Фокусное расстояние системы линз определяется таким же образом, как и в предыдущем упражнении, путём измерения на опыте расстояний  $L$  и  $l$ . Зная фокусное расстояние собирающей линзы  $F_2$  и, вычислив из выражения (2.11) фокусное расстояние  $F$  системы, по формуле (2.12) находят фокусное расстояние  $F_3$  рассеивающей линзы.

### УПРАЖНЕНИЕ IV

#### Определение фокусного расстояния линзы методом главной плоскости

Определение фокусных расстояний линз с помощью коллиматора основано на его свойстве давать параллельный пучок света. Пусть щель коллиматора, установленного на бесконечность, освещена пучком света. Тогда из линзы коллиматора выходит параллельный пучок световых лучей. Поставив на пути параллельного пучка исследуемую линзу, мы получим в её фокальной плоскости изображение щели. Заменяв узкую щель в коллиматоре каким-либо предметом, например сеткой, мы получим в фокусе исследуемой линзы её изображение.

Определение фокусных расстояний линз и основано на измерении расстояния  $a$  от поверхности линзы до её фокуса и расстояния  $\delta$  от оптического центра линзы до её поверхности (рис. 2.3).

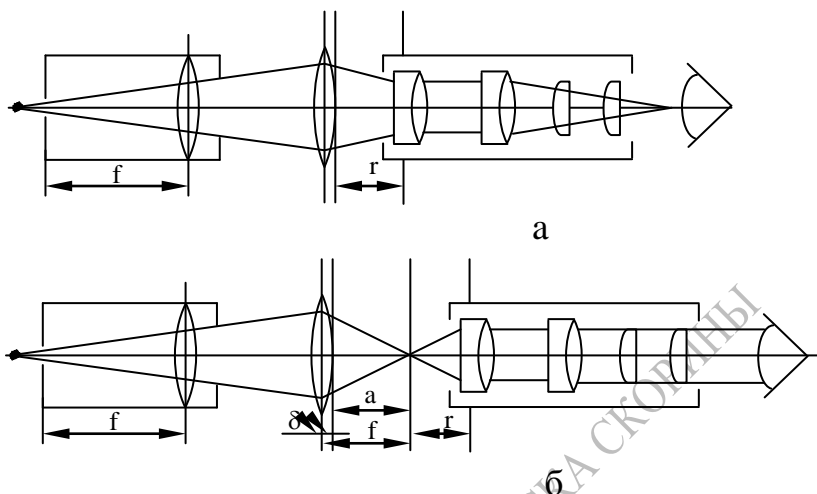


Рис. 2.3.

Тогда

$$F = a + \delta, \quad (2.13)$$

где  $F$  – фокусное расстояние исследуемой линзы.

Для определения  $a$  измерительный микроскоп устанавливают на оптический рельс и фокусируют его на изображении мира (сетки) и снимают по шкале рельса отсчёт  $A_2 = a + r$ , где  $r$  – фокусное расстояние микроскопа.

Затем передвигают микроскоп ближе к линзе и фиксируют его на заднюю поверхность линзы. Снимают отсчёт  $A_1 = r$ .

Тогда  $A_2 - A_1 = a$ .

Передвигая микроскоп ещё ближе к линзе, фокусируют его на переднюю поверхность линзы и снимают отсчёт  $A_0$ .

$$A_1 - A_0 = 2\delta.$$

Фокусировку на поверхности линзы осуществляют по царапинам, которые имеются на поверхностях линзы.

Затем по формуле (2.13) определяют фокусное расстояние исследуемой линзы.

**УПРАЖНЕНИЕ V**  
**Определение фокусного расстояния линзы**  
**методом увеличения**

Для определения фокусного расстояния линзы может быть использован также метод увеличения (рис. 2.4).

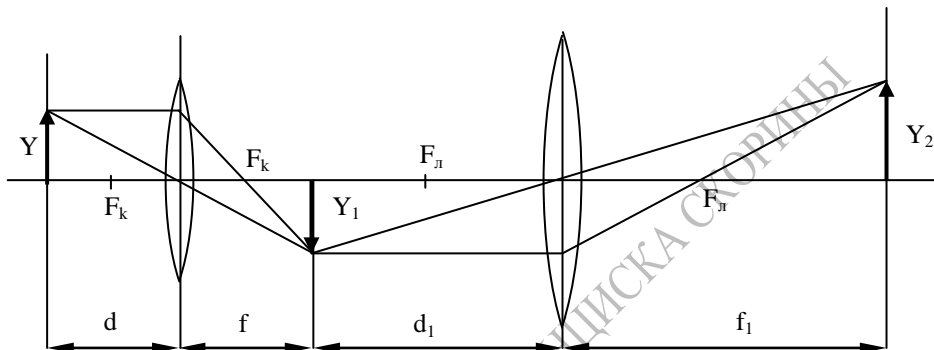


Рис. 2.4.

Пусть предмет находится на расстоянии  $d$  от линзы коллиматора. Тогда его изображение  $Y_1$  в этой линзе будет наблюдаться на расстоянии  $f$  с другой стороны от линзы коллиматора и на расстоянии  $d_1$  от исследуемой линзы. Изображение предмета во второй линзе образуется на расстоянии  $f_1$  от неё. Как следует из рис. 2.4, для увеличений, даваемых первой и второй линзами, справедливы соотношения:

$$\frac{Y_1}{Y} = \frac{f}{d} ; \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{f_1}{d_1} ; \frac{Y_2}{Y} = \frac{f \cdot f_1}{d \cdot d_1} . \quad (2.14)$$

Необходимо отметить, что для действительных изображений увеличение отрицательно, т.е. изображение обратное, а для мнимых изображений увеличение положительно, т.е. изображение прямое.

Если предмет приближать к фокусу линзы коллиматора ( $d \rightarrow F_k$ ), то его изображение  $Y_1$  в этой линзе будет удаляться на бесконечность ( $f \rightarrow \infty$ ,  $d_1 \rightarrow \infty$ ), а изображение предмета  $Y_2$  в исследуемой линзе будет приближаться к её фокусу ( $f_1 \rightarrow F_n$ ). Поэтому для предмета, находящегося в фокусе коллиматора, из (2.14) следует

$$\frac{Y_2}{Y} = \frac{f_1}{d} = \frac{F_l}{F_k}.$$

Отсюда фокусное расстояние линзы равно:

$$F_l = F_k \frac{Y_2}{Y}. \quad (2.15)$$

1. Поместить в фокусе объектива коллиматора щель и установить её ширину  $Y=0,02$  мм.
2. Разместить на станине исследуемую линзу и микроскоп с окулярным винтовым микрометром. Передвигая микроскоп по станине, добиться чёткого изображения щели.
3. Наблюдая в окуляр, вращением барабана совместить центр перекрестия с левым краем изображения щели и снять по шкале барабана отсчёт  $m$ . Затем, вращая барабан, совместить центр перекрестия с правым краем изображения щели и снять по шкале барабана отсчёт  $n$ . Вычислить ширину изображения щели по формуле:

$$Y_2 = (n - m)t,$$

где  $t = 0,001$  мм – цена деления микроскопа-микрометра.

4. Зная фокусное расстояние объектива коллиматора  $F_k = 1600$  мм, с помощью соотношения (2.15) вычислить фокусное расстояние исследуемой линзы  $F_l$ . Сравнить  $F_l$  со значением, полученным с помощью метода главной плоскости.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют фокусным расстоянием линзы?
2. От чего зависит фокусное расстояние линзы?
3. В чём суть определения фокусного расстояния линз по методу Бесселя?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСКОПА

Цель работы: изучить работу микроскопа и экспериментально определить его основные характеристики.

Приборы и принадлежности: микроскоп, объектив-микрометр, миллиметровая шкала, штатив, штангенциркуль, лампа.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для нормального глаза наименьшее расстояние отчетливого видения примерно равно 25 см. Это расстояние наиболее удобно для рассматривания деталей предмета. Поэтому увеличение приборов, служащих для рассматривания близких предметов, определяется как отношение углового размера изображения, получающегося на расстоянии наилучшего зрения (обычно 25 см), к угловому размеру предмета, отнесенного на то же расстояние. Одним из таких приборов является микроскоп, оптическая система которого состоит из короткофокусного объектива и окуляра-лупы, в котором увеличение осуществляется в два этапа.

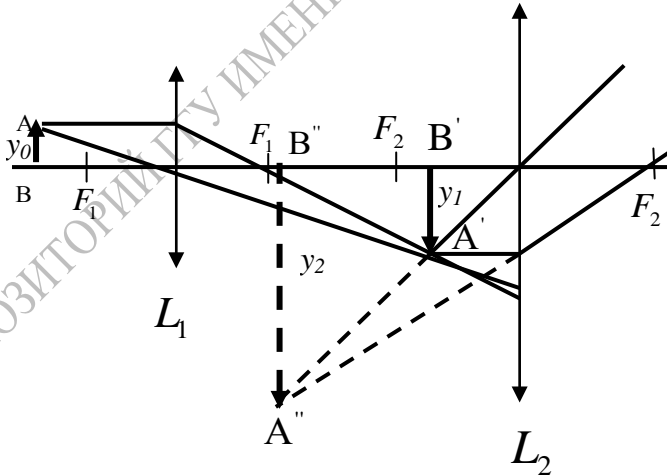


Рис. 3.1



Первоначально объектив микроскопа образует увеличенное изображение предмета в плоскости, удобной для рассматривания через окуляр. При этом увеличение объектива равно

$$k_{об} = \frac{y_1}{y_0} = \frac{f_1}{F_1}, \quad (3.1)$$

где  $f_1$  – расстояние от объектива до изображение,  $F_1$  – фокусное расстояние объектива,  $y_1$  и  $y_0$  – линейные размеры изображения и предмета. Увеличение окуляра

$$k_{ок} = \frac{y_2}{y_1} = \frac{D}{F_2}, \quad (3.2)$$

где  $F_2$  – фокусное расстояние окуляра. Учтено также, что изображение получаем на расстоянии наилучшего зрения ( $D \approx 25$  см). Увеличение всей системы равно произведению увеличений объектива и окуляра

$$k = k_{ок} k_{об} = \frac{y_1}{y_0} \cdot \frac{y_2}{y_1} = \frac{y_2}{y_0} = \frac{f_1 D}{F_1 F_2}. \quad (3.3)$$

Так как изображение, даваемое объективом, получается вблизи фокуса окуляра, а фокусное расстояние окуляра мало, то  $f_1$  можно принять равным оптической длине тубуса  $\Delta$  и тогда

$$k = k_{ок} k_{об} \approx \frac{D}{F_2} \cdot \frac{\Delta}{F_1}. \quad (3.4)$$

Здесь  $\Delta$  – оптический интервал между объективом и окуляром (расстояние между задним фокусом объектива  $F_1$  и передним фокусом окуляра  $F_2$ ). В применении к микроскопу величину  $\Delta$  называют оптической длиной тубуса. Ее следует отличать от механической длины тубуса (расстояния между линзами), которая обычно составляет 160 мм (у всех микроскопов выпускаемых отечественной промышленностью) или 190 мм. Увеличения объективов и окуляров обычно указываются на их оправках.

Другая величина – числовая апертура объектива  $A$  определяется следующим образом:

$$A = n \sin \theta, \quad (3.5)$$

где  $n$  – показатель преломления среды, в которой находится рассматриваемый предмет,  $\theta$  – апертурный угол, равный половине угла при вершине конуса лучей, исходящих из осевой точки предмета и попадающих в объектив.

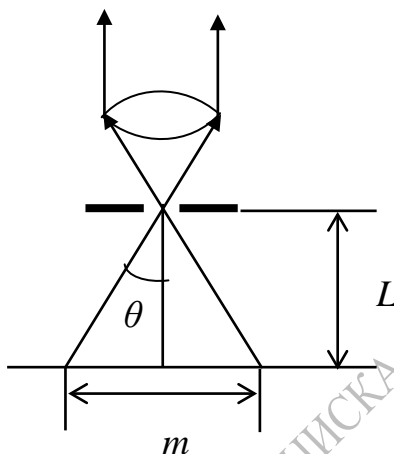


Рис. 3.2.

Явление дифракции затрудняет возможность различать мелкие детали рассматриваемых предметов. В результате дифракции на круглом отверстии апертурной диафрагмы точка предмета в фокальной плоскости объектива микроскопа изобразится окруженной дифракционным кольцом. Поэтому близко расположенные точки будут видны в плоскости изображений как слившиеся кольца. Разрешающая сила микроскопа  $\varepsilon$ , т.е. минимальное расстояние между точками предмета, которые наблюдаются еще раздельно, может быть найдена из дифракционной теории:

$$\varepsilon = \frac{0.61\lambda}{n \sin \theta} = \frac{0.61\lambda}{A}, \quad (3.6)$$

где  $\lambda$  – длина волны света, в котором ведется наблюдение,  $A$  – числовая апертура объектива.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для проведения исследований состоит из микроскопа, объективного микрометра, закрепленной вертикально миллиметровой шкалы, штангенциркуля и диафрагмы. На окуляре микроскопа имеется насадка с призмой, которая позволяет совместить шкалу окуляра с изображением миллиметровой шкалы.



Рис. 3.3.

Общий вид микроскопа показан на рис. 3.3. Все детали микроскопа крепятся на массивном основании 1. Оптическая часть сосредоточена в тубусе 2, в верхней части которого крепится окуляр 3, а в нижней части – объектив 4. Наблюдаемый объект располагают на предметном столике 5. Под предметным столиком находится зеркало 6, с помощью которого производится освещение объекта светом. Наводка на резкость осуществляется вертикальным перемещением всего тубуса с помощью рукояток, одна из которых (7) служит для быстрого, а вторая (8) для медленного перемещения.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Определение увеличения микроскопа

1. Установить на предметный столик микроскопа объективный микрометр и совместить его шкалу со шкалой окулярного микрометра.

Определить цену деления окулярного микрометра по формуле:

$$a = \frac{b_0}{b_1} 0.01 \text{ мм},$$

где  $b_0$  – количество делений шкалы объективного микрометра по 0,01мм каждое, которым соответствует  $b_1$  делений шкалы окулярного микрометра.

2. Разместить вертикальный масштаб на расстоянии  $\approx 25$ см от оси микроскопа и с помощью зеркальной насадки, надетой на окуляр, добиться совмещения миллиметровой шкалы со шкалой окулярного микрометра. Сосчитав количество  $n$  делений окулярной шкалы по  $a$  мм каждое, соответствующее  $N$  делениям миллиметровой шкалы, найти увеличения микроскопа по формуле:

$$K = \frac{N}{na}.$$

3. Повторив опыт несколько раз, найти среднее значение  $K$ . Полученные увеличения микроскопа сравнить с увеличением, вычисленным по формуле (3.3).

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Вычисление числовой апертуры объектива микроскопа

1. Вставить в отверстие предметного столика диафрагму и сфокусировать микроскоп на ее края.
2. Вынуть окуляр микроскопа и разместить под объективом (на ножках основания) штангенциркуль.
3. Произвести измерения и вычислить апертурный угол по формуле:

$$\theta = \arctg\left(\frac{m}{2L}\right),$$

где  $m$  – часть линейки штангенциркуля, видимая сквозь тубус в отверстия окуляра,  $L$  – расстояние от верхней поверхности предметного столика до штангенциркуля (рис.3.2).

4. По формуле (3.5) вычислить числовую апертуру микроскопа.

## УПРАЖНЕНИЕ III

### Определение разрешающей силы микроскопа

1. Сверху микроскопа вместо вынутого окуляра положить желтый светофильтр с длиной волны  $\lambda_{жс} = 600$  нм.

2. Разместить под объективом микроскопа штангенциркуль.
3. Произвести измерения и вычислить числовую апертуру для желтого света по аналогии с упражнением II.
4. По формуле (3.6) вычислить разрешающую силу микроскопа.
5. Аналогичные измерения произвести для синего светофильтра с  $\lambda = 450$  нм и вычислить для него разрешающую силу микроскопа. Сделать выводы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Прохождение света через линзу. Построение изображения. Формула линзы.
2. Использование лупы и микроскопа для получения увеличенного изображения предмета.
3. Основные характеристики микроскопа: увеличение, числовая апертура, предел разрешения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЙ СТЕКЛА МИКРОСКОПОМ И ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ Тел РЕФРАКТОМЕТРОМ

Цель работы: 1) определить показатели преломления жидких и твердых веществ; 2) определить среднюю дисперсию вещества.

Приборы и принадлежности: микроскоп МБУ-4, рефрактометр ИРФ-454, объективный микрометр, набор образцов.

#### **ЧАСТЬ 1**

#### **ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ Тел С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА**

#### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

При наблюдении предмета сквозь слой воды или стеклянную пластинку предмет всегда кажется расположенным ближе к наблюдателю, чем в действительности. Это кажущееся приближение связано с преломлением света на границе пластинки с воздухом и зависит как от толщины пластинки, так и от её коэффициента преломления. Измеряя толщину пластинки с помощью микрометра, а кажущееся смещение предмета при наблюдении сквозь пластинку с помощью микроскопа, тубус которого снабжен микрометрическим винтом, можно определить коэффициент преломления пластинки. Положим на столик микроскопа плоскопараллельную стеклянную пластинку толщины  $d$  с нанесенными на нее с обеих сторон неглубокими царапинами. Для удобства распознавания царапины на верхней и нижней сторонах пластинки наносятся перпендикулярно друг другу. Микроскоп фокусируют на царапину, находящуюся на верхней стороне пластинки и, чтобы увидеть в микроскоп царапину, находящуюся на нижней стороне пластинки, тубус микроскопа необходимо переместить на некоторое расстояние  $x$  (рис. 4.1). Вследствие преломления лучей  $x < d$ .

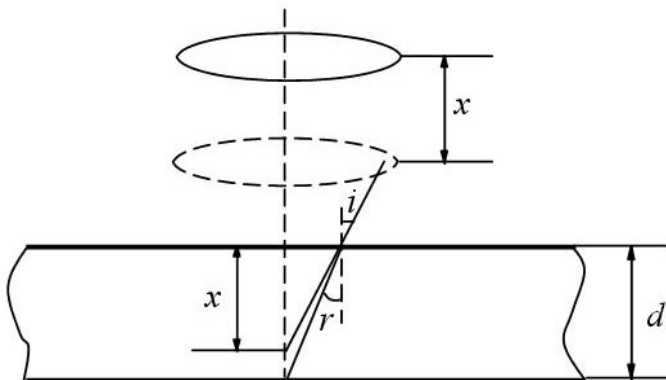


Рис. 4.1.

Рассмотрим один из лучей, идущих в объектив от царапины, находящейся на нижней стороне пластинки. Из рис. 4.1 следует, что вследствие обратимости лучей

$$\frac{\operatorname{tgi}}{\operatorname{tgr}} = \frac{d}{x}$$

Если ограничимся малыми углами наблюдения, то

$$\frac{\operatorname{tgi}}{\operatorname{tgr}} \approx \frac{\sin i}{\sin r} = n$$

и, следовательно,

$$n = \frac{d}{x} \quad (4.1)$$

Измеряя толщину пластинки  $d$  и перемещение  $x$  тубуса микроскопа при перефокусировке его с верхней стороны пластинки на нижнюю, определяют показатель преломления  $n$ .

Истинная толщина пластинки  $d$  измеряется микрометром, кажущаяся толщина пластинки равна разности отсчетов положений тубуса при наводке микроскопа на верхнюю и нижнюю царапины.

Головка микрометрического винта имеет указатель, перемещающийся по шкале, нанесенной на неподвижном диске.

Установив микроскоп так, чтобы отчетливо была видна верхняя царапина, отмечают по диску микрометрического винта деление  $K_1$ , стоящее против указателя. Затем вращением микрометрического винта перемещают весь тубус микроскопа вниз, добываясь отчетливого видения нижней царапины.

При этом отсчитывается целое число оборотов винта (обозначим его через  $m$ ) и деление диска  $K_2$ , против которого устанавливается указатель.

Обозначим через  $S$  шаг винта, а число делений на диске винта обозначим через  $N$ , тогда находим цену  $Z$  одного деления диска микрометрического винта:

$$Z = \frac{S}{N}$$

Например: если шаг винта  $S = 0,107$  мм, а число делений на диске 50, то цена одного деления диска  $Z = 0,002$  мм.

Следовательно,  $m$  полных оборотов винта перемещают тубус микроскопа на  $mS$  мм, а разность делений винта  $K_2 - K_1$  соответствует перемещению тубуса на  $(K_2 - K_1)Z$  мм.

Таким образом, перемещение тубуса микроскопа дает величину кажущейся толщины пластинки.

$$x = mS + (K_2 - K_1)Z \quad (4.2)$$

Подставляя это выражение в формулу (4.1), получим окончательную формулу для вычисления показателя преломления стекла:

$$n = \frac{d}{mS + (K_2 - K_1)Z} \quad (4.3)$$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе для определения показателя преломления твердых веществ используется микроскоп МБУ-4 с шагом винта  $S = 0,107$  мм и ценой деления барабана  $Z = 0,002$  мм; набор пластинок из стекла, оргстекла и слюды, объективный микрометр.

Истинная толщина пластинки измеряется микрометром.



## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. С помощью микрометра измеряют истинную толщину пластинки.
2. Помещают стеклянную пластинку с царапинами на столик микроскопа и фокусируют его на верхнюю царапину. Снимают по барабану отсчет  $K_1$ .
3. Затем с помощью микрометрического винта опускают тубус микроскопа, подсчитывая число полных оборотов барабана  $m$ , и фокусируют его на нижнюю царапину. Снимают по барабану отсчет  $K_2$ .
4. По формуле (4.3) определяют показатель преломления стекла.
5. Аналогичные измерения выполняют для оргстекла и слюды и вычисляют по формуле (4.3) для них показатели преломления.

### ЧАСТЬ 2

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ РЕФРАКТОМЕТРОМ ИРФ-454

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

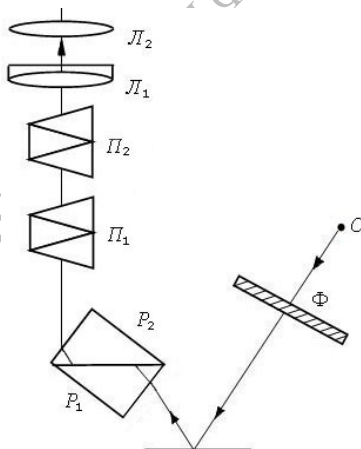


Рис. 4.2.

Рефрактометр ИРФ-454 служит для определения показателей преломления жидких и твердых тел. Оптическая схема рефрактометра представлена на рис. 4.2.

Основной его частью являются две стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$ , изготовленные из стекла с большим показателем

преломления. Призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами; зазор между призмами имеет ширину около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости.

Окрашенность границы света-тени устраняется вращением призм Амичи  $P_1$  и  $P_2$ . Наблюдение производят через окуляр  $L_2$ . Перекрестие с призмой  $P_1$  служит для совмещения границы раздела света и тени.

Ход лучей при работе по методу скользящего луча изображен на рис. 4.3.

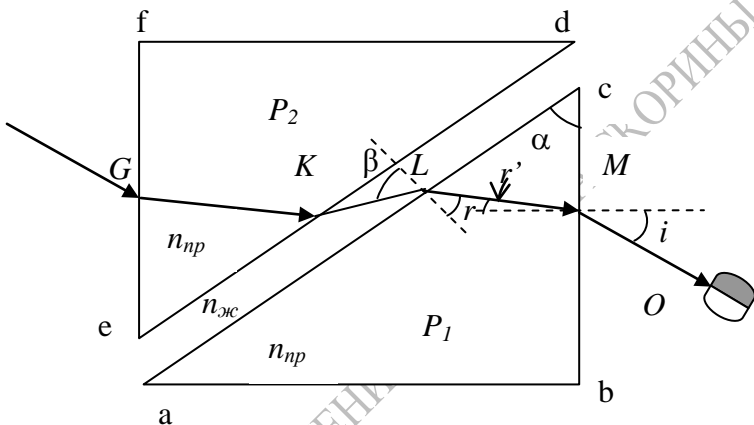


Рис. 4.3.

Грань  $ed$  призмы  $P_2$  матовая и служит для освещения рассеянным светом жидкости, нанесенной тонким слоем в зазор между призмами  $P_1$  и  $P_2$ . Свет, рассеянный матовой гранью  $ed$  призмы  $P_2$ , проходит плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает на грань  $ac$  призмы  $P_1$  под различными углами ( $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ ). Пучок света, угол падения которого равен  $90^\circ$ , называется скользящим пучком. Так как показатель преломления стекла призмы  $n_{нр}$  больше, чем показатель преломления жидкости  $n_{жс}$ , то скользящий световой пучок, преломляясь на границе жидкость–стекло, пойдет в призме  $P_1$  под предельным углом преломления  $r$ .

Преломление светового пучка на границе жидкость–стекло в точке  $L$  описывается законом преломления

$$\frac{n_{жс}}{n_{нр}} = \sin r, \quad (4.4)$$

где  $n_{np}$  – показатель преломления стекла, из которого изготовлены призмы,  $n_{жс}$  – показатель преломления исследуемой жидкости,  $r$ – угол преломления в призме  $P_1$ .

На границе стекло–воздух в точке  $M$  по выходе светового пучка из призмы  $P_1$  имеем

$$n_{np} \sin r' = \sin i , \quad (4.5)$$

где  $r'$ – угол падения пучка  $LM$  на грань  $cb$  призмы  $P_1$ ,  $i$  – предельный угол выхода пучка света из призмы.

Пучок света  $MO$  представляет собой границу распространения света, прошедшего призму со стороны наименьших углов  $i$ . Получаемая граница светотени определяется лучом, выходящим из призмы  $P_1$  под предельным углом  $i$ .

Преломляющий угол призмы  $P_1$

$$\alpha = r + r' . \quad (4.6)$$

Из соотношений (4.4) – (4.6) получается формула для определения искомого показателя преломления

$$n_{жс} = \sin \alpha \sqrt{n_{np}^2 - \sin^2 i} - \cos \alpha \cdot \sin i , \quad (4.7)$$

где  $n_{np}$  – показатель преломления стекла, из которого изготовлены призмы,  $\alpha$ – преломляющий угол призмы  $P_1$ ,  $i$  – предельный угол выхода луча из призмы  $P_1$ .

Рефрактометр ИРФ-454 можно использовать и для определения показателей преломления твердых тел. Используемый образец должен иметь плоскую полированную поверхность. Этой поверхностью он прижимается к гипотенузе  $de$  призмы  $P_2$  (призма  $P_1$  при этом случае отклоняется в сторону). Для обеспечения оптического контакта в зазор между соприкасающимися поверхностями вводится тонкий слой иммерсионной жидкости, показатель преломления которой удовлетворяет условию:  $n_1 \leq n \leq n_2$ . При выполнении этого условия наличие слоя жидкости не искажает результатов измерений.

Изложенная теория рефрактометра, строго говоря, справедлива лишь в том случае, когда свет является монохроматическим. Дисперсия исследуемого вещества и стекла призмы приводит к тому, что величина предельных углов  $r'$  и  $i'_2$  зависит от длины волны  $\lambda$ . При работе с белым светом наблюдаемая в поле зрения граница света и тени часто оказывается размытой и окрашенной. Для того, чтобы получить резкое изображение, перед объективом трубы помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи (призмы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  на рис. 4.3), каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих

различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны  $\lambda=5893\text{\AA}$  (среднее значение длины волны желтого дублета натрия) не испытывал отклонений. Лучи с другими длинами волн отклоняются призмой в ту или иную сторону. В зависимости от взаимной ориентации призмы дисперсия компенсатора изменяется в пределах от 0 до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Мерой дисперсии помещенного на призму образца служит поворот одной призмы компенсатора относительно другой до полного устранения окрашенности границы светотени. Снимая отсчет целых градусов по барабану маховичка и десятых долей градуса по нониусу, определяют  $Z$ .

Используя таблицы 1, 2, 3 (в зависимости от модели рефрактометра и рефрактометрического блока) для измеренного значения показателя преломления  $n_D$  находят величины коэффициентов  $A$  и  $B$ . Так как значение  $n_D$  в таблицах даны через 0,01, то величины  $A$  и  $B$  для промежуточных значений определяют интерполяцией с помощью пропорциональных величин таблицы 4. Для измеренного  $Z$  по таблице 5 находят  $\sigma$ . Для промежуточных значений  $Z$  определяют также интерполяцией, пользуясь пропорциональными величинами таблицы 4. По найденным величинам  $A$ ,  $B$  и  $\sigma$  вычисляют разность показателей преломления  $\Delta n$ .

$$\Delta n = n_F - n_C = A + \sigma B \quad (4.8)$$

Среднее значение дисперсии образца определяют по формуле:

$$\frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{A + \sigma B}{\lambda_F - \lambda_C}, \quad (4.9)$$

где  $\lambda_F = 486,1 \cdot 10^{-9}$  м;  $\lambda_C = 656,3 \cdot 10^{-9}$  м.

Следует учесть, что для значения  $Z$  больше 30 величина  $\sigma$  принимает отрицательное значение.

**ПРИМЕР:** Для воды при  $20^\circ\text{C}$   $n_D = 1,3330$

Отсчёты  $Z$  по шкале компенсатора

С одной стороны	С другой стороны
36,4	36,4
36,4	36,3
36,4	36,3
36,5	36,5
36,3	36,5
Среднее 36,4	36,4

Общее среднее  $Z = 36,4$

Из таблицы 1:

для  $n_D = 1,330$      $A = 0,02373$      $B = 0,05393$

для  $n_D = 1,340$      $A = 0,02368$      $B = 0,05359$

$\Delta n_D = 0,010$      $\Delta A = -5$      $\Delta B = -34$

Тогда  $\Delta n_D = 0,001$      $\Delta A = -0,5$      $\Delta B = -3,4$

По таблице пропорциональных частей в столбце, соответствующем табличной разнице 5 для  $A$  и табличной разнице 34 для  $B$ , находим приращение для 3-го и 4-го десятичного знаков, то есть для  $n_D = 1,33$      $A = 0,02373$      $B = 0,05393$

$\Delta n_D = 0,001 \cdot 3 = 0,003$      $-0,5 \cdot 3 = -1,5$      $-3,4 \cdot 3 = -10,2$

для  $n_D = 1,333$      $A = 0,023715$      $B = 0,053828$

Результаты округляем до 5-го знака.

Найдем  $\sigma$  для  $Z = 36,4$  пользуясь таблицами 4 и 5.

для  $Z = 36$      $\sigma = -0,309$

для  $Z = 37$      $\sigma = -0,358$

$\Delta Z = 1$      $\Delta \sigma = -49$ ,

По таблице 4 для 49 имеем:

для  $Z = 36$      $\sigma = -0,309$

0,4     $-4,9 \cdot 4 = -19,6$

для  $Z = 36,4$      $\sigma = -0,3286$

По найденным значениям  $A$ ,  $B$  и  $\sigma$  определяем:

$n_F - n_C = A + \sigma B = 0,02372 - (0,05383 \cdot 0,3286) = 0,00603$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

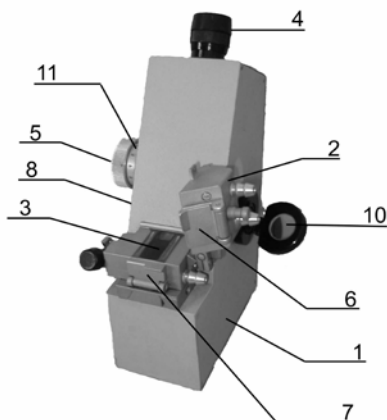


Рис. 4.4.

Рефрактометр ИРФ-454 (рис. 4.4) состоит из корпуса 1, осветительной призмы 2, измерительной призмы 3, окуляра 4, компенсатора, вращающегося с помощью маховичка 5.

Подсветка призм осуществляется зеркалами 6 и 7. Нахождение границы раздела света-тени и совмещение ее с перекрестием сетки осуществляется разворотом зеркала и шкалы вращением маховичка 8, Подсвет лампы производят зеркалом 10.

Компенсатор состоит из двух призм прямого зрения (призм Амичи). Маховичком 5 призмы Амичи поворачиваются одновременно в разные стороны.

При этом изменяется угловая дисперсия компенсатора и устраняется окрашенность границы раздела света и тени. Вместе с маховичком 5 вращается и шкала 11, с которой снимается отсчет для определения дисперсии призм. Поворот маховичка на одно деление шкалы определяют по нониусу. Одно деление нониуса соответствует повороту призм Амичи на  $0,3^\circ$ .

Среднюю дисперсию вещества определяют по формуле (4.7) пересчетом показаний шкалы и нониуса по специальным таблицам, приведенным в работе, с использованием значения измеренного показателя преломления вещества.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

### **УПРАЖНЕНИЕ I**

#### **Определение показателей преломления жидкостей**

1. Помещают между призмами пипеткой несколько капель исследуемой жидкости (воды) (рис. 4.4).
2. Поворотом зеркала 6 и 10 добиваются хорошей освещенности поля зрения окуляра и шкалы.
3. Вращением маховичка 8 добиваются совмещения границы раздела света и тени с перекрестием окуляра.
4. Вращением маховичка 5 добиваются устранения окрашенности границы света и тени.
5. Через окуляр по шкале определяют показатель преломления воды.
6. Тщательно протерев призмы спиртом, проводят аналогичные измерения для глицерина, трансформаторного масла и определяют их показатели преломления.

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение показателей преломления твердых тел

1. Между призмами помещают несколько капель иммерсионной жидкости, на нее кладут пластинку из стекла и прижимают призмой. В качестве иммерсионной жидкости используют трансформаторное масло, у которого показатель преломления больше показателя преломления стеклянной пластинки  $n_c$ , но меньше показателя преломления призмы  $n_{пр}$ ,  $n_c < n_{жс} < n_{пр}$ .
2. Зеркало 6 закрывают, а зеркалом 7 делают подставку нижней грани призмы.
3. Вращением маховичков 5 и 8 устраняют окрашенность границы света-тени и добиваются совмещения её с перекрестием окуляра.
4. По шкале окуляра снимают значение показателя преломления пластинки.
5. Аналогичные измерения проводят и для других образцов.

## УПРАЖНЕНИЕ III

### Определение средней дисперсии образца

1. Между призмами помещают несколько капель иммерсионной жидкости и кладут на нее пластинку из стекла. Определяют показатель преломления стекла по методике, описанной в упражнении II.
2. Совмещают перекрестие с границей раздела света-тени.
3. Вращая маховичок 5 по часовой стрелке, добиваются исчезновения окрашенности границы света-тени. По шкале барабана маховичка 5 снимают отсчет  $Z$  целых градусов и по нониусу десятых долей градуса, взяв за начало отсчета начало шкалы нониуса.
4. Продолжая вращение маховичка 5 по часовой стрелке, вновь добиваются исчезновения окрашенности границы света-тени. Вновь снимают отсчет  $Z$ , взяв за начало отсчета конец шкалы нониуса, т.е. отсчет берут с обратной стороны. Проводят по пять таких измерений с каждой стороны нониуса и вычисляют среднее значение  $Z$ .
5. Используя таблицу 1 с учетом поправок по таблице 2, находят коэффициенты  $A$  и  $B$ .
6. Для измеренного значения  $Z$ , используя таблицу 5, с учетом поправок по таблице 2 находят  $\sigma$ .
7. По формуле (4.6) вычисляют разность показателей преломления  $\Delta n$ .

8. Среднее значение дисперсии определяют по формуле (4.7). По окончании работы моют грани призм дистиллированной водой и протирают ватой, смоченной в спирте.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Принцип Ферма. Законы преломления и отражения света.
2. Показатель преломления, его физический смысл. Абсолютный и относительный показатели преломления. Зависимость показателя преломления от температуры.
3. Почему объект кажется расположенным ближе при наблюдении его через плоскопараллельную пластинку?
4. Сущность явления полного внутреннего отражения.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОЖИНИ



Таблица 1  
Таблица для определения средней дисперсии при измерении  $n_D=1.2-1.7$   
ИРФ-454А с рефрактометрическим блоком 1

$n_D$	A	$\Delta$	B	$\Delta$	$n_D$	A	$\Delta$	B	$\Delta$
1,200	0,02444	-6	0,05603	-1	1,450	0,02330	-2	0,04812	-67
1,210	0,02438	-6	0,05602	-3	1,460	0,02328	-2	0,04745	-69
1,220	0,02432	-6	0,05599	-6	1,470	0,02326	-2	0,04676	-74
1,230	0,02426	-6	0,05593	-9	1,480	0,02324	-1	0,04602	-75
1,240	0,02420	-6	0,05584	-11	1,490	0,02323	-2	0,04527	-80
1,250	0,02414	-6	0,05573	-14	1,500	0,02321	-1	0,04447	-83
1,260	0,02408	-5	0,05559	-16	1,510	0,02320	0	0,04364	-86
1,270	0,02403	-6	0,05543	-18	1,520	0,02320	-1	0,04278	-91
1,280	0,02397	-5	0,05525	-22	1,530	0,02319	0	0,04187	-94
1,290	0,02392	-5	0,05503	-24	1,540	0,02319	+1	0,04093	-98
1,300	0,02387	-5	0,05479	-26	1,550	0,02320	0	0,03995	-103
1,310	0,02382	-5	0,05453	-29	1,560	0,02320	+1	0,03892	-107
1,320	0,02377	-4	0,05424	-31	1,570	0,02321	+2	0,3785	-113
1,330	0,02373	-5	0,05393	-34	1,580	0,02323	+2	0,03672	-117
1,340	0,02368	-4	0,05359	-36	1,590	0,02325	+3	0,03555	-122
1,350	0,02364	-4	0,05323	-39	1,600	0,02328	+3	0,03432	-129
1,360	0,02360	-4	0,05284	-42	1,610	0,02331	+4	0,03303	-135
1,370	0,02356	-4	0,05242	-44	1,620	0,02335	+4	0,03168	-143
1,380	0,02352	-4	0,05198	-47	1,630	0,02339	+6	0,03025	-150
1,390	0,02348	-3	0,05151	-50	1,640	0,02345	+6	0,02875	-160
1,400	0,02345	-3	0,05101	-52	1,650	0,02351	+8	0,02715	-169
1,410	0,02342	-4	0,05049	-55	1,660	0,02359	+9	0,02546	-181
1,420	0,02338	-2	0,04994	-58	1,670	0,02368	+11	0,02365	-185
1,430	0,02336	-3	0,04936	-61	1,680	0,02379	+13	0,02170	-211
1,440	0,02333	-3	0,04875	-63	1,690	0,02392	+16	0,01959	-233
1,450	0,02330		0,04812		1,700	0,02408		0,01726	

Таблица 2

Таблица для определения средней дисперсии при измерении  $n_D=1,6-2,0$   
ИРФ-454А с рефрактометрическим блоком 2

$n_D$	A	$\Delta$	B	$\Delta$	$n_D$	A	$\Delta$	B	$\Delta$
1,600	0,06292	-12	0,05143	+9	1,800	0,06123	-5	0,04815	-44
1,610	0,06280	-10	0,05152	+6	1,810	0,06118	-5	0,04771	-46
1,620	0,06270	-11	0,05158	+3	1,820	0,06113	-4	0,04725	-49
1,630	0,06259	-10	0,05161	0	1,830	0,06109	-4	0,04676	-51
1,640	0,06249	-10	0,05161	-2	1,840	0,06105	-4	0,04625	-54
1,650	0,06239	-10	0,05159	-5	1,850	0,06101	-3	0,04571	-57
1,660	0,06229	-9	0,05154	-8	1,860	0,06098	-2	0,04514	-60
1,670	0,06220	-9	0,05146	-10	1,870	0,06096	-3	0,04454	-63
1,680	0,06211	-9	0,05136	-13	1,880	0,06093	-1	0,04391	-66
1,690	0,06202	-9	0,05123	-15	1,890	0,06092	-2	0,04325	-68
1,700	0,06193	-8	0,05108	-18	1,900	0,06090	0	0,04257	-72
1,710	0,06185	-8	0,05090	-20	1,910	0,06090	-1	0,04185	-75
1,720	0,06177	-8	0,05070	-23	1,920	0,06089	+1	0,04110	-79
1,730	0,06169	-8	0,05047	-26	1,930	0,06090	+1	0,04031	-82
1,740	0,06161	-7	0,05021	-28	1,940	0,06091	+2	0,03949	-85
1,750	0,06154	-7	0,04993	-30	1,950	0,06093	+2	0,03864	-89
1,760	0,06147	-6	0,04963	-33	1,960	0,06095	+3	0,03775	-93
1,770	0,06141	-6	0,04930	-36	1,970	0,06098	+4	0,03682	-96
1,780	0,06135	-6	0,04894	-38	1,980	0,06102	+5	0,03586	-101
1,790	0,06129	-6	0,04856	-41	1,990	0,06107	+6	0,03485	-105
1,800	0,06123		0,04815		2,000	0,06113		0,03380	

Таблица 3  
Таблица для определения средней дисперсии при измерении  $n_D=1,2-1,7$   
ИРФ-454Б

$n_D$	A	$\Delta$	B	$\Delta$	$n_D$	A	$\Delta$	B	$\Delta$
1,200	0,02444	-6	0,03295	-1	1,450	0,02330	-2	0,02829	-39
1,210	0,02438	-6	0,03294	-2	1,460	0,02328	-2	0,02790	-41
1,220	0,02432	-6	0,03292	-3	1,470	0,02326	-2	0,02749	-43
1,230	0,02426	-6	0,03289	-5	1,480	0,02324	-1	0,02706	-42
1,240	0,02420	-6	0,03284	-7	1,490	0,02323	-2	0,02662	-47
1,250	0,02414	-6	0,03277	-8	1,500	0,02321	-1	0,02615	-49
1,260	0,02408	-5	0,03269	-9	1,510	0,02320	0	0,02566	-51
1,270	0,02403	-6	0,03260	-11	1,520	0,02320	-1	0,02515	-53
1,280	0,02397	-5	0,03249	-13	1,530	0,02319	0	0,02462	-55
1,290	0,02392	-5	0,03236	-14	1,540	0,02319	+1	0,02407	-58
1,300	0,02387	-5	0,03222	-15	1,550	0,02320	0	0,02349	-60
1,310	0,02382	-5	0,03207	-17	1,560	0,02320	+1	0,02289	-64
1,320	0,02377	-4	0,03190	-19	1,570	0,02321	+2	0,02225	-66
1,330	0,02373	-5	0,03171	-20	1,580	0,02323	+2	0,02159	-69
1,340	0,02368	-4	0,03151	-21	1,590	0,02325	+3	0,02090	-72
1,350	0,02364	-4	0,03130	-23	1,600	0,02328	+3	0,02018	-76
1,360	0,02360	-4	0,03107	-25	1,610	0,02331	+4	0,01942	-79
1,370	0,02356	-4	0,03082	-26	1,620	0,02335	+4	0,01863	-84
1,380	0,02352	-4	0,03056	-27	1,630	0,02339	+6	0,01779	-89
1,390	0,02348	-3	0,03029	-29	1,640	0,02345	+6	0,01690	-93
1,400	0,02345	-3	0,03000	-31	1,650	0,02351	+8	0,01597	-100
1,410	0,02342	-4	0,02969	-32	1,660	0,02359	+9	0,01497	-106
1,420	0,02338	-2	0,02937	-34	1,670	0,02368	+11	0,01391	-115
1,430	0,02336	-3	0,02903	-42	1,680	0,02379	+13	0,01276	-124
1,440	0,02333	-3	0,02861	-32	1,690	0,02392	+16	0,01152	-137
1,450	0,02330		0,02829		1,700	0,02408		0,01015	

## Пропорциональные части таблиц

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
<b>2</b>	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>3</b>	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0
<b>4</b>	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
<b>5</b>	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
<b>6</b>	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0
<b>7</b>	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0
<b>8</b>	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2	8,0
<b>9</b>	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9,0
	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>
<b>1</b>	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3
<b>2</b>	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,4	3,6	4,0	4,4	4,6
<b>3</b>	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5	5,1	5,4	6,0	6,6	6,9
<b>4</b>	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0	6,8	7,2	8,0	8,8	9,2
<b>5</b>	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,5	9,0	10,0	11,0	11,5
<b>6</b>	6,6	7,2	7,8	8,4	9,0	10,2	10,8	12,0	13,2	13,8
<b>7</b>	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5	11,9	12,6	14,0	15,4	16,1
<b>8</b>	8,8	9,6	10,4	11,2	12,0	13,6	14,4	16,0	17,6	18,4
<b>9</b>	9,9	10,8	11,7	12,6	13,5	15,3	16,2	18,0	19,8	20,7
	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>
<b>1</b>	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
<b>2</b>	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
<b>3</b>	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2
<b>4</b>	9,6	10,0	10,4	10,8	11,2	12,0	12,4	12,8	13,2	13,6
<b>5</b>	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0
<b>6</b>	14,4	15,0	15,6	16,2	16,8	18,0	18,6	19,2	19,8	20,4
<b>7</b>	16,8	17,5	18,2	18,9	19,6	21,0	21,7	22,4	23,1	23,4
<b>8</b>	19,2	20,0	20,8	21,6	22,4	24,0	24,8	25,6	26,4	27,2
<b>9</b>	21,6	22,5	23,4	24,3	25,2	27,0	27,9	28,8	29,7	30,6

Продолжение таблицы 4

	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>
<b>1</b>	3,5	3,6	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
<b>2</b>	7,0	7,2	7,6	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	9,0	9,2
<b>3</b>	10,5	10,8	11,4	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,8
<b>4</b>	14,0	14,4	15,2	16,0	16,4	16,8	17,2	17,6	18,0	18,4
<b>5</b>	17,5	18,0	19,0	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0
<b>6</b>	21,0	21,6	22,8	24,0	24,6	25,2	25,8	26,4	27,0	27,6
<b>7</b>	24,5	25,2	26,6	28,0	28,7	29,4	30,1	30,8	31,5	32,2
<b>8</b>	28,0	28,8	30,4	32,0	32,8	33,6	34,4	35,2	36,0	36,8
<b>9</b>	31,5	32,4	34,2	36,0	36,9	37,8	38,7	39,6	40,5	41,4
	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>58</b>
<b>1</b>	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,4	5,5	5,6	5,8
<b>2</b>	9,4	9,6	9,8	10,0	10,2	10,4	10,8	11,0	11,2	11,6
<b>3</b>	14,1	14,4	14,7	15,0	15,3	15,6	16,2	16,5	16,8	17,4
<b>4</b>	18,8	19,2	19,5	20,0	20,4	20,8	21,6	22,0	22,4	23,2
<b>5</b>	23,5	24,0	24,5	25,0	25,5	26,0	27,0	27,5	28,0	29,0
<b>6</b>	28,2	28,8	29,4	30,0	30,6	31,2	32,4	33,0	33,6	34,8
<b>7</b>	32,9	33,6	34,3	35,0	35,7	36,4	37,8	38,5	39,2	40,6
<b>8</b>	37,6	38,4	39,2	40,0	40,8	41,6	43,2	44,0	44,8	46,4
<b>9</b>	42,3	43,2	44,1	45,0	45,9	46,8	48,6	49,5	50,4	52,2
	<b>59</b>	<b>60</b>	<b>63</b>	<b>64</b>	<b>65</b>	<b>67</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>72</b>	<b>74</b>
<b>1</b>	5,9	6,0	6,3	6,4	6,5	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4
<b>2</b>	11,8	12,0	12,6	12,8	13,0	13,4	13,8	14,0	14,4	14,8
<b>3</b>	17,7	18,0	18,9	19,2	19,5	20,1	20,7	21,0	21,6	22,2
<b>4</b>	23,6	24,0	25,2	25,6	26,0	26,8	27,6	28,0	28,8	29,6
<b>5</b>	29,5	30,0	31,5	32,0	32,5	33,5	34,5	35,0	36,0	37,0
<b>6</b>	35,4	36,0	37,8	38,4	39,0	40,2	41,4	42,0	43,2	44,4
<b>7</b>	41,3	42,0	44,1	44,8	45,5	46,9	48,3	49,0	50,4	51,8
<b>8</b>	47,2	48,0	50,4	51,2	52,0	53,6	55,2	56,0	57,6	59,2
<b>9</b>	53,1	54,0	56,7	57,6	58,5	60,3	62,1	63,0	64,8	66,6

Продолжение таблицы 4

	<b>76</b>	<b>79</b>	<b>81</b>	<b>82</b>	<b>84</b>	<b>87</b>	<b>89</b>	<b>90</b>	<b>92</b>	<b>95</b>
<b>1</b>	7,6	7,9	8,1	8,2	8,4	8,7	8,9	9,0	9,2	9,5
<b>2</b>	15,2	15,8	16,2	16,4	16,8	17,4	17,8	18,0	18,4	19,0
<b>3</b>	22,8	23,7	24,3	24,6	25,2	26,1	26,7	27,0	27,6	28,5
<b>4</b>	30,4	31,6	32,4	32,8	33,6	34,8	35,6	36,0	36,8	38,0
<b>5</b>	38,0	39,5	40,5	41,0	42,0	43,5	44,5	45,0	46,0	47,5
<b>6</b>	45,6	47,4	48,6	49,2	50,4	52,2	53,4	54,0	55,2	57,0
<b>7</b>	53,2	55,3	56,7	57,4	58,8	60,9	62,3	63,0	64,4	66,5
<b>8</b>	60,8	63,2	64,8	65,6	67,2	69,6	71,2	72,0	73,6	76,0
<b>9</b>	68,4	71,1	72,9	73,8	75,6	78,3	80,1	81,0	82,8	85,5
	<b>96</b>	<b>99</b>	<b>101</b>	<b>103</b>	<b>105</b>	<b>111</b>	<b>116</b>	<b>121</b>	<b>128</b>	<b>134</b>
<b>1</b>	9,6	9,9	10,1	10,3	10,5	11,1	11,6	12,1	12,8	13,4
<b>2</b>	19,2	19,8	20,2	20,6	21,0	22,2	23,7	24,2	25,6	26,8
<b>3</b>	28,8	29,7	30,3	30,9	31,5	33,3	34,8	36,3	38,4	40,2
<b>4</b>	38,4	39,6	40,4	41,2	42,0	44,4	46,4	48,4	51,2	53,6
<b>5</b>	48,0	49,5	50,5	51,5	52,5	55,5	58,0	60,5	64,0	67,0
<b>6</b>	57,6	59,4	60,6	61,8	63,0	66,6	69,6	72,6	76,8	80,4
<b>7</b>	67,2	69,3	70,7	72,1	73,5	77,7	81,2	84,7	89,6	93,8
<b>8</b>	76,8	79,2	80,8	82,4	84,0	88,8	92,8	96,8	102,4	107,2
<b>9</b>	86,4	89,1	90,9	92,7	94,5	99,9	104,4	108,9	115,2	120,6
	<b>141</b>	<b>150</b>	<b>159</b>	<b>169</b>	<b>181</b>	<b>195</b>	<b>212</b>	<b>234</b>		
<b>1</b>	14,1	15,0	15,9	16,9	18,1	19,5	21,2	23,4		
<b>2</b>	28,2	30,0	31,8	33,8	36,2	39,0	42,4	46,8		
<b>3</b>	42,3	45,0	47,7	50,7	54,3	58,5	63,6	70,2		
<b>4</b>	56,4	60,0	63,6	67,6	72,4	78,0	84,8	93,6		
<b>5</b>	70,5	75,0	79,5	84,5	90,5	97,5	106,0	117,0		
<b>6</b>	84,6	90,0	95,4	101,4	108,6	117,0	127,2	140,4		
<b>7</b>	98,7	105,0	111,3	118,3	126,7	136,5	148,4	163,8		
<b>8</b>	112,8	120,0	127,2	135,2	144,8	156,0	169,6	187,2		
<b>9</b>	126,9	135,0	143,1	152,1	162,9	175,5	190,8	210,6		

Таблица 5

Таблица для определения  $\sigma$  по  $Z$ 

$Z$	$\sigma$	$\Delta$	$Z$	$Z$	$\sigma$	$\Delta$	$Z$
0	1.000		60	16	0.669		44
1	0.999	-1	59	17	0.629	-40	43
2	0.995	-4	58	18	0.588	-41	42
3	0.988	-7	57	19	0.545	-43	41
4	0.978	-10	56	20	0.500	-45	40
5	0.966	-12	55	21	0.454	-46	39
6	0.951	-15	54	22	0.407	-47	38
7	0.934	-17	53	23	0.358	-49	37
8	0.914	-20	52	24	0.309	-49	36
9	0.891	-23	51	25	0.259	-50	35
10	0.866	-25	50	26	0.208	-51	34
11	0.839	-27	49	27	0.156	-52	33
12	0.809	-30	48	28	0.104	-52	32
13	0.777	-32	47	29	0.052	-52	31
14	0.743	-34	46	30	0.000	-52	30
15	0.707	-36	45				
		-38					

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

## ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цель работы: изучить способы поляризации света, проверить выполнение законов Малюса и Брюстера.

Приборы и принадлежности: поляризатор, анализатор, диэлектрическое зеркало, поворотный столик, стопа Столетова, осветитель, набор светофильтров, источник питания, газовый лазер ЛГН–109, фотоприемник, микроамперметр.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Исходя из волновой теории, видимый свет представляет собой электромагнитные волны с длинами волн от 400 до 760 нм.

Электромагнитные волны характеризуются векторами напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Волна, у которой поверхностями постоянных фаз являются плоскости, называется плоской.

Векторы напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей плоской волны в вакууме перпендикулярны направлению распространения волны. Это означает, что электромагнитная волна является поперечной. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в плоской волне изменяются в одинаковой фазе, т.е. одновременно достигают максимальных и нулевых значений (рис. 5.1).

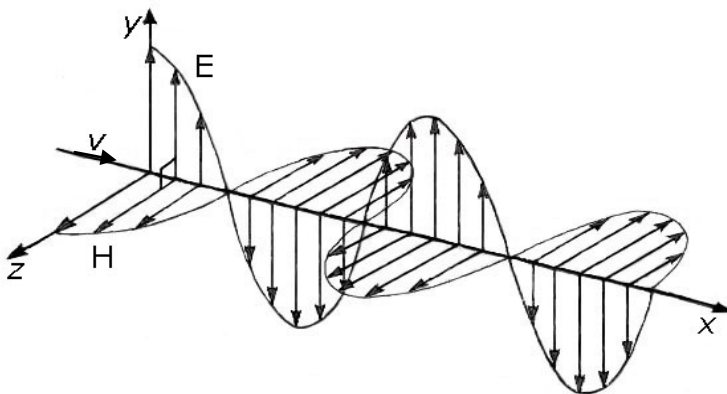


Рис. 5.1.



Плоская волна называется линейно поляризованной или плоско поляризованной, если электрический вектор  $\vec{E}$  с течением времени сохраняет свое положение в одной плоскости, в которой расположена также нормаль  $N$  к фронту волны (рис.5.2)

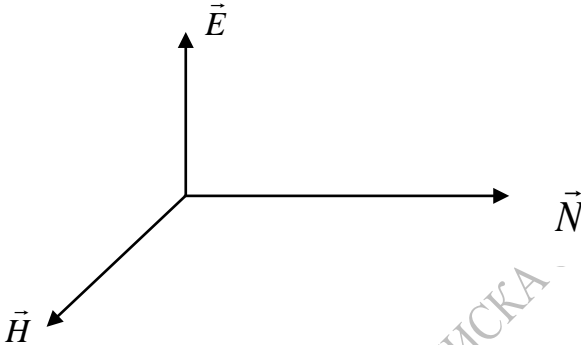


Рис. 5.2.

Эта плоскость называется плоскостью колебаний или плоскостью поляризации. От поляризованного света следует отличать естественный свет. В нем в каждый момент времени векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{N}$ , хотя и остаются взаимно перпендикулярными, но направления векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  беспорядочно изменяются с течением времени. Поэтому естественный свет обладает (статистически) осевой симметрией относительно направления его распространения. Для линейно поляризованного света такой симметрии нет. Его свойства в различных плоскостях, проходящих через направление нормали  $\vec{N}$ , различны. Среди этих плоскостей есть две избранные плоскости, в одной из которых лежит вектор  $\vec{E}$ , а в другой – вектор  $\vec{H}$ . Смесь естественного света с линейно поляризованным называется частично поляризованным светом.

Схематически модуль вектора  $\vec{E}$  в этом случае изменяется от значения  $E_{max}$  до  $E_{min}$  в зависимости от ориентации плоскости пропускания анализатора поляризации. Так как интенсивность света  $I$  пропорциональна квадрату амплитуды волны  $E^2$ , то и интенсивность света изменяется от  $I_{max}$  до  $I_{min}$ .

Степенью поляризации называют величину  $P$ , равную

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} . \quad (5.1)$$

Для характеристики частично поляризованного света используется величина  $\rho = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}$ , называемая поляризационным отношением.

Тогда из соотношения (5.1) имеем

$$P = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} . \quad (5.2)$$

Существуют различные способы получения поляризованного света. Рассмотрим некоторые из них, предварительно определив необходимые понятия.

Оптической анизотропией называется зависимость оптических свойств среды от направления. Все прозрачные кристаллы (кроме кристаллов кубической системы, которые оптически изотропны) обладают способностью двойного лучепреломления, т.е. раздваивания каждого падающего на них светового пучка. При этом образовавшиеся световые лучи распространяются в кристалле с различными скоростями. Направление в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления, называется оптической осью кристалла.

Линейно поляризованный свет можно получить, воспользовавшись явлением двойного лучепреломления.

Явление двойного лучепреломления заключается в том, что при прохождении света через прозрачные анизотропные среды, у которых физические свойства по различным направлениям неодинаковы, световой луч разделяется на два. Показатель преломления одного из лучей не зависит от направления распространения луча. Такой луч называется обыкновенным. Для другого из лучей показатель преломления зависит от направления распространения луча. Такой луч называется необыкновенным (рис. 5.3).

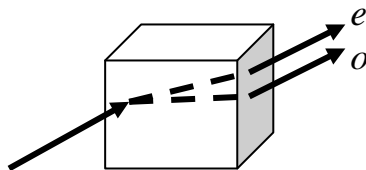


Рис. 5.3

Необыкновенный луч ( $e$ ) поляризован в плоскости падения, обыкновенный ( $o$ ) – в плоскости, перпендикулярной к плоскости падения.

Двоупреломляющие кристаллы обладают свойством дихроизма, т.е. различного поглощения света в зависимости от ориентации электрического вектора световой волны. Сильным дихроизмом обладают кристаллы турмалина. В кристалле турмалина толщиной в 1 мм полностью поглощается обыкновенный луч, и из него выходит необыкновенный линейно поляризованный луч света. Еще большим дихроизмом обладает кристалл герпатита (йодистого хинина). Пластина герпатита толщиной в 0,1 мм полностью поглощает обыкновенный луч света. Кристаллы герпатита используются в поляроидных пленках для получения поляризованного света. Поляририд представляет собой прозрачную пленку, в которую вкраплены микроскопические кристаллы герпатита. Поляририды способны пропускать широкий спектр излучения, однако не обеспечивают полной поляризации света, особенно в синей области, и неодинаково прозрачны для лучей разных цветов.

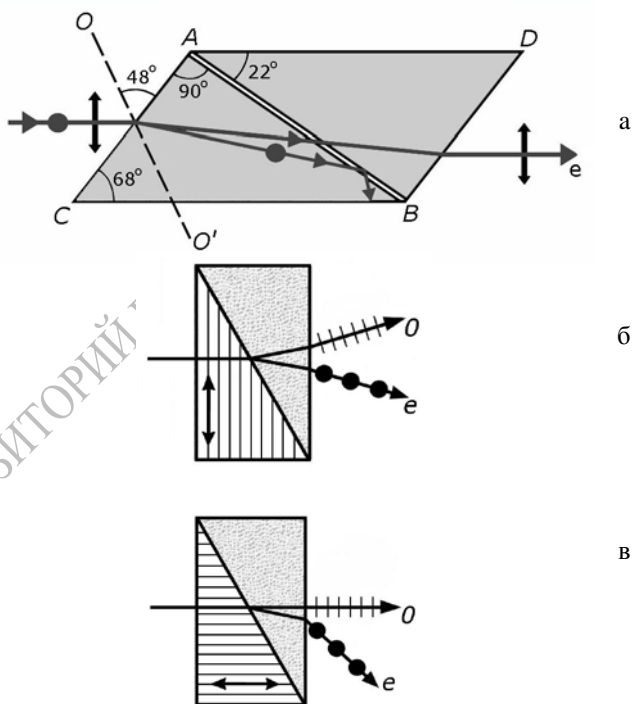


Рис. 5.4.

Для получения поляризованного света широко используют различные поляризующие призмы. Призма Николя (николь) состоит из двух прямоугольных призм с преломляющими углами  $68^\circ$  и  $22^\circ$ , изготовленных из кристалла исландского шпата и склеенных прозрачной смолой (канадским бальзамом). При падении на такую призму естественного света происходит разделение луча на два. Обыкновенный испытывает полное внутреннее отражение, и из нее выходит необыкновенный линейно поляризованный луч света (рис. 5.4а).

Призма Волластона (рис. 5.4б) состоит из двух кварцевых прямоугольных призм, у которых оптические оси кристалла расположены во взаимно перпендикулярных направлениях: в первой призме оптическая ось параллельна вертикальному ребру призмы, во второй – перпендикулярна плоскости чертежа. Из нее выходят линейно поляризованные обыкновенный и необыкновенный лучи.

Призма Рошона (рис. 5.4в) имеет такое же строение и тот же материал, что и призма Волластона, но оптическая ось кристалла в первой призме теперь направлена параллельно горизонтальной грани призм. Расхождение лучей в призме Рошона несколько меньше, чем в призме Волластона.

Рассмотрим классические опыты с турмалином (рис.5.5). Если естественный свет направить перпендикулярно пластинке турмалина  $T_1$ , вырезанной параллельно оптической оси  $OO'$ , то из пластинки выйдет линейно поляризованный свет. Убедиться в линейности поляризации можно, если на пути луча поставить такую же вторую пластинку турмалина. Интенсивность прошедшего света будет максимальной, если плоскости световых колебаний параллельны друг другу. Первая пластинка турмалина  $T_1$ , служащая для получения поляризованного света, называется поляризатором, вторая  $T_2$  – анализатором. Если угол между плоскостями световых колебаний поляризатора и анализатора равен  $90^\circ$ , то интенсивность прошедшего света равна нулю.

При промежуточных значениях угла  $\alpha$  (рис. 5.5) интенсивность  $I$  прошедшего через анализатор света определяется законом Малюса: интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор, прямо пропорциональна квадрату косинуса угла  $\alpha$  между направлением колебаний света, падающего на анализатор, и направлением колебаний, которые анализатор пропускает без ослабления

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (5.3)$$

где  $I_0$  – интенсивность света, вышедшего из поляризатора,  $I$  – интенсивность света, вышедшего из анализатора,  $\alpha$  – угол между оптическими осями кристаллов (плоскостями световых колебаний поляризатора и анализатора).

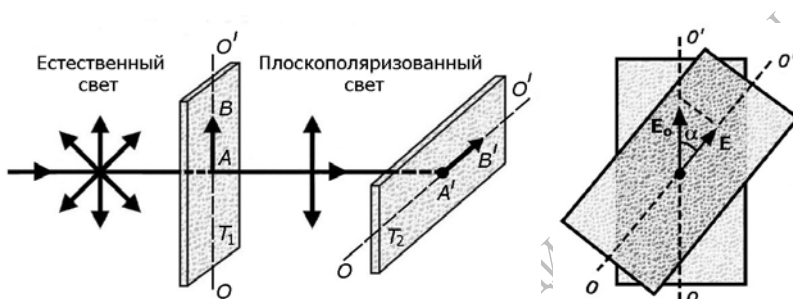


Рис. 5.5.

Если на границу раздела двух прозрачных диэлектриков направить естественный луч света, то часть светового потока отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Помещая на пути преломленного и отраженного лучей анализатор, например, пластинку турмалина, можно исследовать их поляризацию. Опыты показывают, что интенсивность отраженного света доходит до минимума, когда плоскость световых колебаний анализатора параллельна плоскости падения, и достигает максимума, при повороте анализатора на  $90^\circ$ .

Оказывается, что как отраженный, так и преломленный лучи частично поляризованы. А при угле падения  $i_B$  (рис. 5.6), для которого выполняется соотношение:

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (5.4)$$

отраженный луч полностью поляризован. Это соотношение получило название закона Брюстера. Если неполяризованный свет падает под углом Брюстера, то составляющая с электрическим вектором, лежащим в плоскости падения, отражаться не будет. Отраженный свет окажется поляризованным и притом перпендикулярно к плоскости

падения. В этом случае угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ .

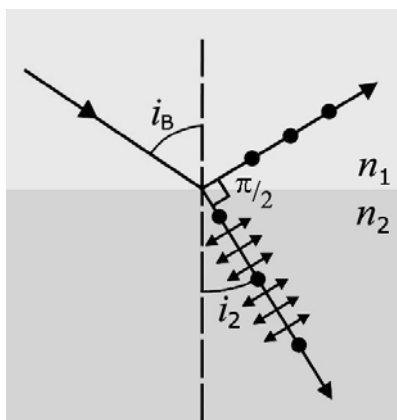


Рис. 5.6.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для изучения поляризации света состоит из осветителя 1, поляризатора 2, анализатора 3, фотоэлемента 4, размещенных на оптическом рельсе 5 (рис. 5.7а). Фототок измеряется микроамперметром 6. Поляризатор и анализатор могут вращаться вокруг горизонтальной оси и снабжены устройством отсчета углов.

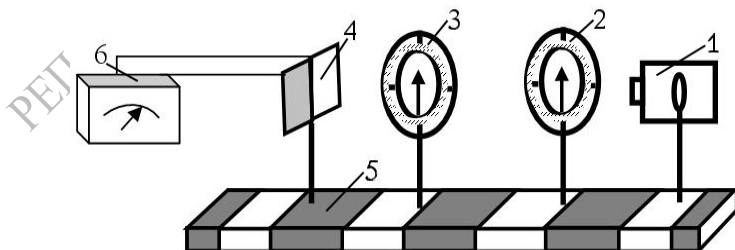


Рис. 5.7а

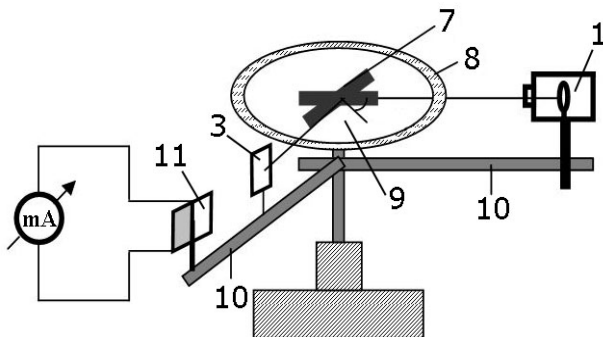


Рис. 5.76

Для проверки закона Брюстера используют диэлектрическое зеркало 7, закрепленное на круглой горизонтальной платформе 8, снабженной устройством отсчета углов 9 (рис. 5.76). На вертикальной оси платформы закреплены кронштейны 10, вращающиеся в горизонтальной плоскости. На кронштейнах крепятся с одной стороны осветитель 1, а с другой фотоприемник 11 и анализатор 3.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Включить тумблер блока питания осветителя. Поворачивая рычаг реостата, добиться нормального накала лампочки.

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Проверка закона Малюса

1. На оптическом рельсе размещают осветитель, поляризатор, анализатор и фотоэлемент.
2. Поворачивая анализатор, добиваются максимального показания тока микроамперметром. Так как величина фототока  $i$  пропорциональна интенсивности света  $I$ , падающего на фотоэлемент ( $i=kI$ ), то этому положению поляризаторов будет соответствовать угол между их плоскостями колебаний  $\gamma=0$ .
3. Изменяя угол  $\gamma$  через каждые  $10^\circ$  от  $0$  до  $90^\circ$ , измеряют величину фототока и вычисляют отношение  $a = \frac{i_2}{i_0} = \frac{I_2}{I_0}$  для каждого угла  $\gamma$ .
4. Строят график зависимости  $a$  от угла  $\gamma$ .

5. Из закона Малюса следует, что  $\frac{I_2}{I_0} = \cos^2 \gamma$ . Поэтому на том же графике строят теоретическую кривую  $\cos^2 \gamma = f(\gamma)$ . Сравнивая эти кривые, убеждаются в выполнении закона Малюса.

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Измерение угла Брюстера, определение показателя преломления диэлектрического зеркала

1. На оптическую ось помещают круглую платформу с закрепленным диэлектрическим зеркалом.
2. На кронштейнах платформы закрепляют с одной стороны осветитель, с другой – анализатор с фотоэлементом.
3. С осветителя 1 (рис.5.8.) направляют на диэлектрическое зеркало 2 под определенным углом луч света. Отразившись от зеркала, он проходит через анализатор и попадает на фотоэлемент. Если диэлектрическое зеркало повернуть на угол  $\beta$ , то отраженный луч повернется на угол  $\alpha = 2\beta$ . Так как  $\varphi + \beta = 90^\circ$ , то по углу  $\alpha$  поворота отраженного луча можно определить угол падения луча на зеркало  $\varphi = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}$  (рис.5.8).

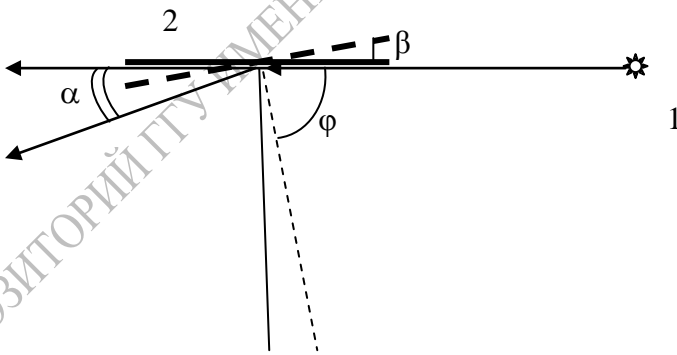


Рис. 5.8.

4. Устанавливают кронштейн с анализатором под углом к падающему лучу. Поворачивая диэлектрическое зеркало, добиваются максимального показания микроамперметра. При таком положении отраженный луч полностью попадает на фотоэлемент.
5. Вращая анализатор вокруг горизонтальной оси, добиваются минимального показания микроамперметра. При дальнейших исследованиях положение анализатора не изменяется.



6. Увеличивая угол  $\beta$  через каждые  $5^\circ$  в пределах от  $5^\circ$  до  $65^\circ$ , поворачивают кронштейн с анализатором и фотоэлементом через  $10^\circ$  и снимают показания микроамперметра.
7. По результатам измерений строят график зависимости фототока  $i$  от угла  $\alpha$ , т.е.  $i=f(\alpha)$  и определяют угол  $\alpha_{\min}$ , которому соответствует минимальный ток.
8. По формуле  $\varphi_B = 90^\circ - \frac{\alpha_{\min}}{2}$  определяют угол Брюстера (см. п3, рис.5.8).
9. Используя закон Брюстера  $tg \varphi_B = n = \sqrt{\varepsilon}$ , вычисляют показатель преломления и диэлектрическую проницаемость материала диэлектрика для света определенной длины волны с помощью светофильтров.

### УПРАЖНЕНИЕ III а

#### Исследование зависимости степени поляризации света, отраженного от диэлектрического зеркала, от угла поворота зеркала

1. Поворачивают анализатор на  $90^\circ$ .
2. Как и в предыдущем упражнении, наряду с минимальным измеряют и максимальный ток, при каждом повороте зеркала на  $5^\circ$ .
3. Для каждого угла вычисляют степень поляризации по формуле:  $p = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}$ , где  $i_{\max}$ ,  $i_{\min}$  – фототоки, регистрируемые микроамперметром.
4. Строят график зависимости  $p=f(\beta)$ .

### УПРАЖНЕНИЕ III б

#### Исследование зависимости степени поляризации света, прошедшего через стопу Столетова, от угла наклона ее к падающему лучу

1. С оптического рельса убирают платформу с диэлектрическим зеркалом.
2. Размещают на рельсе осветитель, анализатор и фотоэлемент.
3. Перед осветителем в специальном держателе с устройством отсчета углов закрепляют стопу Столетова. Прошедший через стопу Столетова и анализатор луч осветителя попадает на фотоэлемент.
4. Поворачивая стопу вокруг вертикальной оси через  $5^\circ$ , измеряют, подобно предыдущему упражнению  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$ , и для каждого угла определяют степень поляризации  $P$ .

5. Строят график зависимости  $P=f(\alpha)$ .

### УПРАЖНЕНИЕ III в

#### Определение степени поляризации газового лазера

1. На оптический рельс вместо осветителя помещают газовый лазер, а также анализатор вместе с фотоэлементом.
2. Вращая анализатор вокруг своей оси, измеряют  $i_{max}$  и  $i_{min}$ .
3. По формуле (5.1) вычисляют степень поляризации и убеждаются в том, что излучение газового лазера линейно поляризовано.

### УПРАЖНЕНИЕ III г

#### Определение степени поляризации естественного света

1. С оптического рельса убирают газовый лазер, оставляя только анализатор вместе с фотоэлементом.
2. Открывают штору и направляют на анализатор естественный свет.
3. Вращая анализатор, измеряют  $i_{max}$  и  $i_{min}$ .
4. По формуле (5.1) вычисляют степень поляризации и убеждаются в том, что она близка к «0».

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называют поляризованным?
2. Какие существуют способы получения поляризованного света?
3. Как проверить закон Малюса и закон Брюстера?
4. Что такое степень поляризации?
5. Чему равна степень поляризации газового лазера и естественного света?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Цель работы: а) определение зависимости удельного вращения от длины волны;

б) определение концентрации сахара в растворе.

Приборы и принадлежности: круговой поляриметр СМ-3, набор светофильтров, растворы сахара различных концентраций.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Явления, возникающие при взаимодействии света с веществом, чрезвычайно многообразны. Среди них важное место занимает вращение плоскости поляризации света. Вещества, способные вращать плоскость поляризации света в отсутствие внешнего воздействия, называются оптически активными. Существуют как кристаллические, так и аморфные вещества, обладающие оптической активностью (скипидар, камфара, никотин, раствор сахара и др.).

В рамках феноменологической электромагнитной теории света объяснение вращения плоскости поляризации света было дано Френелем, а затем развито М. Борном. Френель предположил, что в оптически активной среде с различными скоростями распространяются две волны, поляризованные вправо и влево по кругу. Пройдя один и тот же путь в веществе за разное время, две поляризованные волны будут характеризоваться электрическими векторами  $\vec{E}_{\text{лев.}}$  и  $\vec{E}_{\text{прав.}}$ , повернутыми на различные углы, что приведет к повороту вектора  $\vec{E}$  в результирующей плоскополяризованной волне на некоторый угол  $\alpha$ . В случае кристаллов главной причиной различия скоростей следует считать отсутствие центра симметрии. По Борну для однородных аморфных тел необходимо учесть взаимодействие электромагнитного поля с каждой молекулой, которую нужно представить в виде сложной ассиметричной молекулы с пространственной структурой, не имеющей ни центра симметрии, ни плоскости симметрии. Например, молекула сахара и других органических соединений содержит несколько ассиметрично расположенных атомов углерода.

Опытное определение угла поворота плоскости поляризации для данной оптически активной среды может служить способом расчета концентрации вещества в растворе. Приборы, предназначенные для

измерения угла вращения плоскости поляризации, называются поляриметрами. Поляриметры, предназначенные для определения концентрации сахара в растворе, называются сахариметрами.

Для растворов были установлены следующие закономерности:

1. угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$  прямо пропорционален толщине слоя  $l$  раствора и прямо пропорционален концентрации  $c$  активного вещества

$$\alpha = \alpha_0 l c \quad , \quad (6.1)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий природу вещества, называемый удельным вращением;  $l$  – длина трубки с раствором;  $c$  – объемная концентрация активного вещества;

2. удельное вращение  $\alpha_0$  для данной оптически активной среды зависит от длины волны и температуры.

Зависимость удельного вращения от длины волны приближенно выражается соотношением

$$\alpha_0 \approx \frac{1}{\lambda^2} \quad . \quad (6.2)$$

От температуры удельное вращение зависит незначительно.

Из формулы (6.1) можно определить удельное вращение

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{lc} \quad . \quad (6.3)$$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

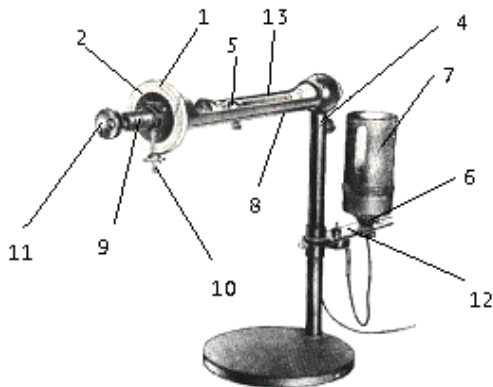


Рис. 6.1.

Установка (рис. 6.1) для наблюдения вращения плоскости поляризации (сахариметр) состоит из источника света со светофильтрами, который может перемещаться по вертикальной составляющей, 2-х призм Николя-поляризатора (П) и анализатора (А) и трубки с исследуемым оптически активным веществом (сахаром). При повороте анализатора в окуляре можно наблюдать изменение освещенности поля зрения.

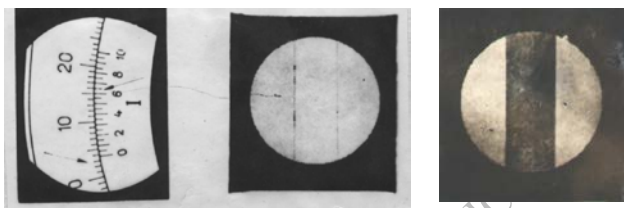


Рис. 6.2.

1. Осветитель-7 (рис. 6.1) включают в сеть переменного тока, через окуляр прибора-11 наблюдают фотометрическое поле. Вращением муфты-9 устанавливают окуляр так, чтобы видеть резкое изображение разделяющих линий тройного поля. После этого вращением фрикциона-10 поворачивают анализатор и добиваются равномерного затемнения поля зрения (рис. 6.2). Незначительное вращение фрикциона вызывает резкое изменение освещенности наблюдаемых частей поля.
2. Установив равномерную затемненность тройного поля зрения в отсутствие трубки с раствором сахара, делают отсчет лимба по нониусу ( $\phi_0$ ) следующим образом: определяют, на сколько полных градусов повернут нуль нониуса по отношению к лимбу. Затем по штриху нониуса, совпадающему с градусным штрихом лимба, отсчитывают доли градуса.

Оцифровка нониуса следующая: 2 соответствует  $0,2^\circ$ ; 4 соответствует  $0,4^\circ$  и т.д. Цена деления нониуса  $0,05^\circ$ . К числу градусов, взятых по лимбу, прибавляют отсчет по нониусу и определяют угол  $\phi_0$ . Установку на равномерную затемненность тройного поля повторяют несколько раз и вычисляют среднее значение  $\overline{\phi_0}$ .



3. По данным таблицы 2 построить графики зависимости:

$$\alpha_0 = f(\lambda) \quad \text{и} \quad \alpha_0 = f\left(\frac{1}{\lambda^2}\right)$$

4. Определить углы вращения плоскости поляризации для 4-х растворов сахара с концентрациями  $c_1, c_2, c_3, c_4$  для длины волны  $\lambda = 5350 \text{ \AA}$  (светофильтр ОС-11) и одного-двух растворов с неизвестной концентрацией  $c_x$ . Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3. Зависимость угла вращения плоскости поляризации от концентрации раствора сахара С.

№ п./п	Концентрация									
	$c_1 = \dots\%$		$c_2 = \dots\%$		$c_3 = \dots\%$		$c_4 = \dots\%$		Для раствора неизвестной концентрации $c_x$	
	$\alpha$	$\bar{\alpha}$	$\alpha$	$\bar{\alpha}$	$\alpha$	$\bar{\alpha}$	$\alpha$	$\bar{\alpha}$	$\alpha$	$\bar{\alpha}$
1										
2										
3										
4										
5										

5. Построить график зависимости  $\alpha = f(c)$  и, убедившись в его линейности, с помощью графика определить неизвестную концентрацию ( $c_x$ ) раствора сахара.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется плоско поляризованным?
2. Какой свет называется циркулярно поляризованным?
3. Получение и анализ поляризованного света.
4. Поляризационные приборы. Принцип их работы.
5. Оптически активные вещества.
6. Принцип работы поляриметра.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Цель работы: определить длину световой волны интерференционным методом.

Приборы и принадлежности: бипризма, микроскоп, оптическая скамья, фонарь, светофильтр, линза, матовый экран, линейка.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Два источника монохроматического света называются когерентными, если разность фаз между испускаемыми волнами остаётся неизменной за время, достаточное для наблюдений.

Пусть имеем два когерентных источника света  $S_1$  и  $S_2$ , расположенных на расстоянии  $\ell$  между собой (рис. 7.1).

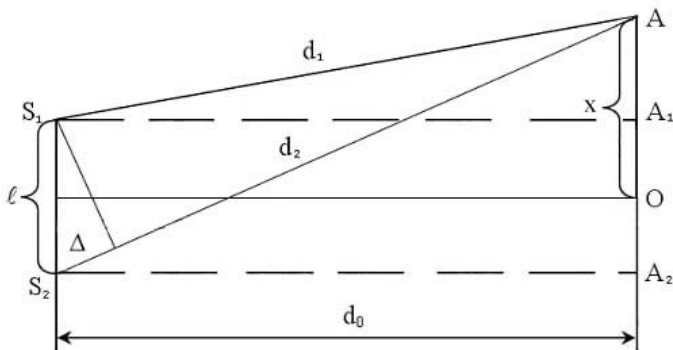


Рис. 7.1.

Рассмотрим интерференционную картину на экране Э, отстоящем на расстоянии  $d_0$  от линии  $S_1S_2$ , в точке  $A$  ( $d_0 \gg \ell$ ). Обозначим расстояние от точек  $S_1$  и  $S_2$  до точки  $A$  через  $d_1$  и  $d_2$ , и расстояние  $OA$  через  $x$ . Характер интерференционной картины в точке  $A$  определяется оптической разностью хода лучей  $\Delta = d_1 - d_2$ . Найдём  $\Delta$ . Из треугольников  $S_1AA_1$  и  $S_2AA_2$  имеем:

$$d_2^2 = d_0^2 + \left(x + \frac{\ell}{2}\right)^2, \quad (7.1)$$



$$d_1^2 = d_0^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2, \quad (7.2)$$

где  $A_1O=OA_2=\frac{l}{2}$ .

Вычитая из (7.1) (7.2), имеем:

$$d_2^2 - d_1^2 = 2l. \quad (7.3)$$

С другой стороны, т.к.  $d_0 \gg l$ , то

$$d_2^2 - d_1^2 = (d_2 + d_1)(d_2 - d_1) \approx 2d_0(d_2 - d_1). \quad (7.4)$$

Приравняв (7.3) и (7.4), получим:

$$2d_0(d_2 - d_1) = 2l,$$

отсюда

$$\Delta = d_2 - d_1 = \frac{xl}{d_0}. \quad (7.5)$$

В точке А будет наблюдаться максимум, если

$$\Delta = m\lambda, \quad (m=0,1,2,3,4\dots) \quad (7.6)$$

и минимум, если

$$\Delta = \frac{(2m+1)\lambda}{2}. \quad (7.7)$$

Тогда расстояние до максимума  $m$ -ого порядка:  $x_m = \frac{m\lambda d_0}{l}$ , а

до максимума  $m+1$ -ого порядка:  $x_{m+1} = \frac{(m+1)\lambda d_0}{l}$ .

Вычитая из второго равенства первое, получим ширину интерференционной полосы:

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda d_0}{l}. \quad (7.8)$$

Отсюда длина световой волны равна

$$\lambda = \frac{\Delta x l}{d_0}. \quad (7.9)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для определения длины световой волны состоит из оптического рельса, на котором расположены источник света, светофильтр, регулируемая щель, бипризма, микроскоп. Для определения расстояния  $\ell$  на оптический рельс ставят линзу и матовый экран.

Бипризма представляет собой две прямоугольные призмы с малыми углами преломления (порядка  $30'$ ) сложенных своими малыми катетами. В качестве источника света используется светящаяся щель. Падающий от щели  $S$  пучок света после преломления в бипризме разделится на два перекрывающихся пучка, как бы исходящих из двух мнимых изображений щели  $S_1$  и  $S_2$ . Эти мнимые изображения щелевого источника света расположены по обе стороны от щели. В области перекрытия световых пучков, идущих от  $S_1$  и  $S_2$ , на экране наблюдают интерференционную картину, состоящую из чередующихся светлых и тёмных полос, причём в центре экрана наблюдается светлая полоса (рис. 7.2).

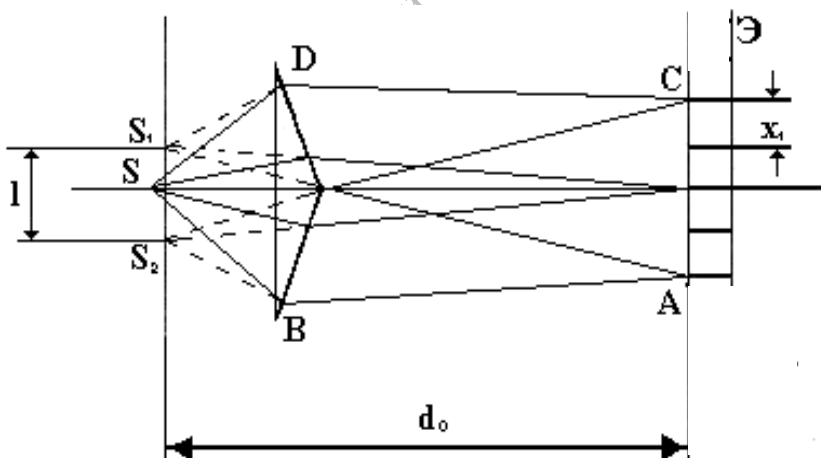


Рис. 7.2.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. На оптическую скамью устанавливают источник света, щель, бипризму и микроскоп так, чтобы окно осветителя, середина щели, преломляющее ребро бипризмы и микроскоп находились на одной высоте и на прямой, проходящей через оптическую ось микроскопа.
2. Получают отчётливую и достаточно яркую интерференционную картину в микроскопе, для этого:
  - а) у окна осветителя ставят красный светофильтр;
  - б) щель помещают на расстоянии 10-30 см от фонаря;
  - в) бипризму помещают на расстоянии от щели так, чтобы её преломляющее ребро было вертикально и строго параллельно щели;
  - г) на некотором расстоянии от бипризмы помещают микроскоп. (Расстояние отсчитывается по указателям, имеющимся внизу оптического рельса).
3. Измеряют расстояние  $d_0$  от щели до экрана.
4. Определяют расстояние  $\Delta x$  между двумя интерференционными полосами (ширину интерференционной полосы). Для этого по шкале микроскопа определяют расстояние между 10 светлыми или тёмными полосами и делят его на 10.

Каждое измерение проводят несколько раз и определяют среднее значение. Зная цену деления шкалы микроскопа  $c$ ,  $\Delta x_{cp}$  определяют из формулы:

$$\Delta x_{cp} = cn,$$

где  $n$  – ширина интерференционной полосы в делениях микроскопа.

5. Находят расстояние  $l$  между мнимыми щелевыми источниками света. Для этого на оптический рельс между бипризмой и микроскопом ставят двояковыпуклую линзу и матовый экран. Не сдвигая с места бипризму и микроскоп, путём передвижения линзы и матового экрана, добиваются на последнем чёткого изображения мнимых щелевых источников  $S_1$  и  $S_2$ . Это изображение щелевых источников света рассматривают в микроскоп и определяют расстояние между изображениями щелей

$$l_1 = cn_1,$$

где  $n_1$  – расстояние между изображением щелевых источников, выраженное в делениях шкалы микроскопа,  $c$  – цена деления шкалы микроскопа.

Находят действительное расстояние между мнимыми щелевыми источниками света по формуле увеличения линзы

$$l = l_1 \frac{a}{b}, \quad (7.10)$$

где  $a$  – расстояние от щели до линзы,  $b$  – расстояние от линзы до экрана,  $l_1$  – расстояние между изображением щелевых источников света на экране.

6. По формуле (7.9) вычисляют длину световой волны.
7. Все данные заносят в таблицу в процессе работы:

Длина тубуса микроскопа	С	А	В	$l_1$		$l = \frac{A}{B} l_1$	$d_0$	$\Delta x$		$\lambda$
				$n_1$	$cn_1$			$n$	$cn$	

Относительную погрешность вычисляют по формуле:

$$E = \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta d_0}{d_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}.$$

Результат записывают в виде:  $\lambda = \lambda_{cp} \pm \Delta \lambda$ .

Таблица цены деления шкалы микроскопа в мм.

Длина тубуса микроскопа	Цена деления шкалы в мм
130	0,040
140	0,035
150	0,030
160	0,025
170	0,020
180	0,015
190	0,010

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие источники называются когерентными?
2. Способы осуществления когерентных волн в оптике.
3. В чём заключается явление интерференции?
4. В чем отличие геометрической и оптической длины пути?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА И С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО СФЕРОМЕТРА

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции света и определение радиуса кривизны линзы.

Приборы и принадлежности: микроскоп с осветителем и набором светофильтров, плоскопараллельная пластинка с линзой в оправе, сферометр ИЗС-7.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В природе часто можно наблюдать радужное окрашивание тонких пленок (мыльные пузыри, масляные пленки на воде), возникающее в результате интерференции света, отраженного двумя поверхностями пленки. Если прозрачную тонкую плёнку осветить монохроматическим светом, то вследствие разделения светового луча на два при отражении и преломлении на передней и задней поверхностях плёнки возникают два когерентных луча. Результат интерференции зависит от оптической разности хода

$$\Delta = 2hn \cos r ,$$

полученной при интерференции двух когерентных лучей, идущих в одном направлении, где  $n$  – показатель преломления плёнки,  $h$  – толщина пленки,  $r$  – угол преломления.

Прозрачная пленка может иметь вид клина. Интерференционная картина, получаемая при отражении света от мест одинаковой толщины, носит название «полос равной толщины», которые локализованы вблизи поверхности клина.

В работе для получения интерференционной картины используется воздушный клин, образованный между плоскопараллельной пластиной  $C$  и плосковыпуклой линзой  $L$  (рис. 8.1).

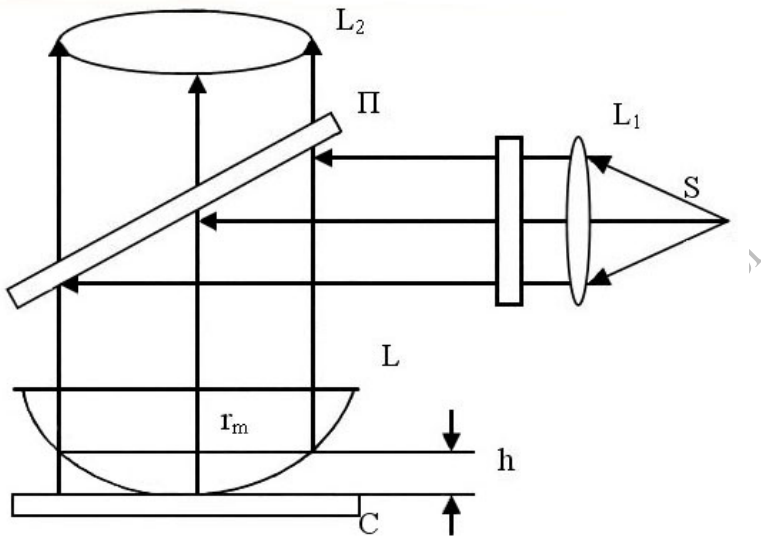


Рис. 8.1.

Интерференционная картина получила название «колец Ньютона». Она состоит из чередующихся светлых и тёмных колец с темным центральным пятном. Для воздушного клина в случае нормального падения монохроматического света разность хода волн равна

$$\Delta = 2h + (\lambda/2),$$

где  $\lambda/2$  – дополнительная разность хода, возникающая из-за изменения фазы на противоположную при отражении. Условия максимума и минимума интенсивности света определяются соответственно выражениями

$$\Delta = 2m(\lambda/2) \quad \text{и} \quad \Delta = (2m+1)(\lambda/2).$$

Используя приведенные условия, можно получить выражение для радиусов  $n$ -го и  $m$ -го темных колец Ньютона:

$$r_n = \sqrt{nR\lambda} \quad ; \quad r_m = \sqrt{mR\lambda}.$$

Тогда радиус кривизны линзы  $R$  равен:

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

Эта формула может служить как для определения радиуса кривизны линзы  $R$ , так и для определения длины волны света  $\lambda$ .

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для наблюдения колец Ньютона в работе используется плосковыпуклая линза с большим радиусом кривизны, положенная на плоскопараллельную пластинку. Интерференционная картина в отраженном свете в виде колец Ньютона наблюдается с помощью микроскопа. Радиус кривизны линзы определяют сферометром ИЗС-7 (рис. 8.2).

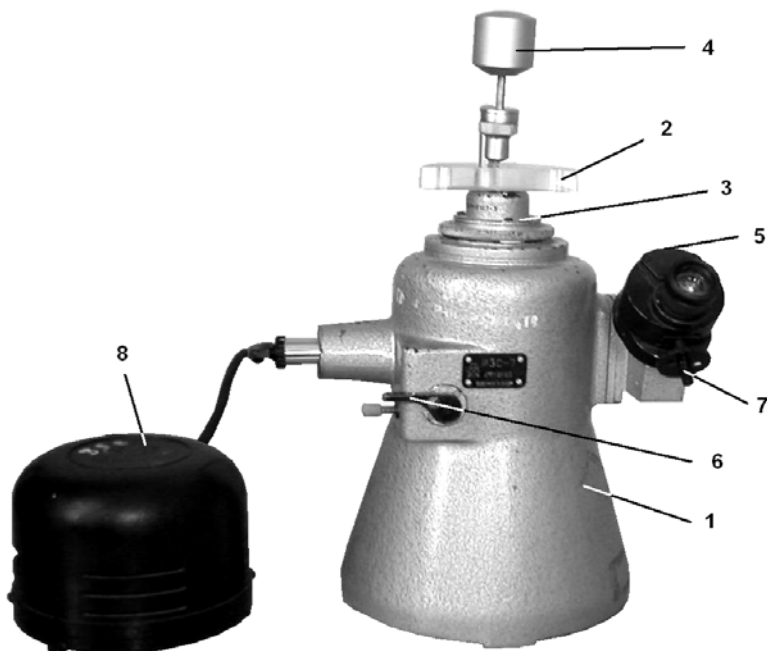


Рис. 8.2.

Внутри корпуса 1 сферометра расположен измерительный стержень с миллиметровой шкалой, обеспечивающий контакт сферического наконечника с измеряемым изделием 2. В верхней части корпуса помещается измерительное кольцо 3 с укрепленными на нем тремя шариками. Упор 4 служит для прижатия изделия к измерительному кольцу. Для установки начального отсчета на ноль или на требуемую величину по миллиметровой шкале измерительного микроскопа служит винт 5. Для отвода измерительного стержня вниз служит рычаг-арретир 6. Маховичок 7 окулярного микрометра служит

для установки вертикального индекса на нулевое деление круговой шкалы. В установке используется трансформатор 8.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Определение радиуса кривизны линзы при наблюдении «колец Ньютона» и с помощью сферометра

1. Под объектив микроскопа поместить пластинку с линзой в оправе, включить осветитель и, перемещая тубус микроскопа и линзу, сфокусировать микроскоп на четкое видение интерференционной картины («кольца Ньютона»).
2. Используя светофильтр ( $\lambda=530$  нм), провести измерения диаметров темных колец во взаимно перпендикулярных направлениях  $d_x$  и  $d_y$ , начиная с колец более высоких порядков. Цена деления окулярного микрометра 0,02 мм. Найти среднее значение диаметров.
3. Вычислить радиус кривизны линзы по формуле:

$$R = \frac{d_m^2 - d_n^2}{4\lambda(m - n)}, \quad (8.1)$$

где  $d_m$  и  $d_n$  – диаметры  $m$ -го и  $n$ -го темных колец, наиболее удаленных друг от друга.

4. Определить радиус кривизны линзы с помощью сферометра ИЗС-7. Определение радиуса кривизны линзы на сферометре сводится к измерению стрелки AD или АК шарового сегмента и вычислению радиуса кривизны (рис. 8.3). Измерение стрелки отдельной сферической поверхности производится следующим образом.

С помощью рычага-арретира измерительный стержень отводят вниз, и на измерительное кольцо осторожно накладывают плоскую стеклянную пластинку.



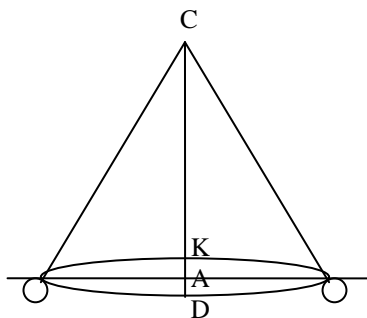


Рис. 8.3.

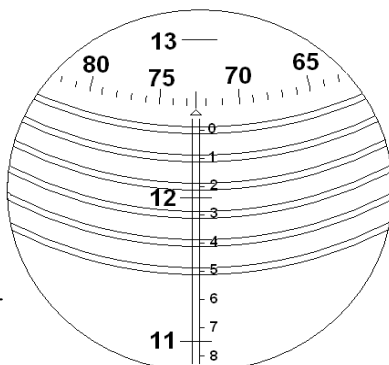


Рис. 8.4.

Рычаг отпускают, и измерительный стержень, плавно поднимаясь, приходит в соприкосновение с пластинкой. Затем с помощью микроскопа производят начальный отсчет по шкале. Для повышения точности измерения отсчеты повторяют 3-5 раз и вычисляют среднее. Далее на кольцо осторожно кладут измеряемую линзу со сферической поверхностью и аналогичным образом производят 3-5 измерений, затем вычисляют среднее. Разность двух средних отсчетов по шкале и даст величину стрелки АК и AD измеряемой сферической поверхности.

#### **Отсчет с помощью микроскопа со спиральным микрометром**

В поле зрения отчетного микроскопа (рис. 8.4) одновременно видны: 2-3 штриха миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами «11», «12», «13», неподвижная шкала десятых долей миллиметра с делениями от «0» до «10», круговая шкала для отсчета сотых и тысячных долей миллиметра и двойные витки спирали. Чтобы произвести отсчет, необходимо предварительно маховиком 7 подвести двойной виток спирали так, чтобы миллиметровый штрих в зоне двойных витков оказался точно посередине между линиями витка. Индексом для отсчета миллиметров служит нулевой штрих десятых долей миллиметра.

На рис. 8.4 миллиметровый штрих «12» прошел нулевой штрих шкалы десятых долей миллиметра, а ближайший штрих «13» еще не дошел до нулевого штриха шкалы десятых долей миллиметра. Отсчет будет 12 мм плюс отрезок штриха «12» до нулевого штриха шкалы десятых долей. В нашем случае число десятых долей миллиметра



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вывести формулу оптической разности хода при интерференции в тонкой пленке.
2. Что представляют собой кольца Ньютона в отраженном и проходящем свете?
3. Почему для наблюдения колец Ньютона радиус кривизны линзы должен быть большим?
4. Каков принцип работы сферометра и методика определения радиуса кривизны линзы?
5. Как изменится интерференционная картина, если между линзой и плоскопараллельной пластинкой поместить не воздух, а другую среду?

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРНЫ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

### ИЗУЧЕНИЕ ЧИСТОТЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА

Цель работы: ознакомить студентов с устройством и принципом действия микроинтерферометра Линника и научить определять чистоту обработки поверхности образцов.

Приборы и принадлежности: микроинтерферометр Линника, исследуемые образцы.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Интерферометры – приборы, в которых явление интерференции света используется для точных измерений показателей преломления прозрачных сред, малых углов, малых удлинений, а также длин волн спектральных линий.

В зависимости от принципа действия они подразделяются на двухлучевые, в которых интерференционная картина образуется за счет интерференции двух когерентных лучей и многолучевые, в которых в образовании интерференционной картины участвуют много лучей. К двухлучевым интерферометрам относятся интерферометры Жамена, Релея, Майкельсона, Линника. К многолучевым – интерферометр Фабри-Перо, пластинка Люмера-Герке.

Микроинтерферометр Линника, используемый в данной работе, представляет собой малый интерферометр Майкельсона, надевающийся на обычный микроскоп. Этот прибор позволяет наблюдать и измерять мельчайшие неровности поверхности и служит для исследования их чистоты обработки.

Схема интерферометра Майкельсона приведена на рис. 9.1. Пучок света от источника  $S$  попадает на плоскопараллельную пластинку  $П$ , покрытую полупрозрачным тонким слоем серебра или алюминия. Эта пластинка частично пропускает, частично отражает свет, разделяя падающий пучок на два взаимно перпендикулярных пучка. Первый пучок  $1$ , пройдя через пластинку  $П$ , отражается обратно зеркалом  $З_1$ , а затем частично отражается от пластинки  $П$ , в направлении зрительной трубы  $T$ . Второй пучок  $2$ , отразившись от покрытой металлом поверхности пластинки  $П$ , направляется к зеркалу  $З_2$ , отражается от него, снова проходит через пластинку  $П$  и идет далее в направлении зрительной трубы  $T$ , как и первый пучок.

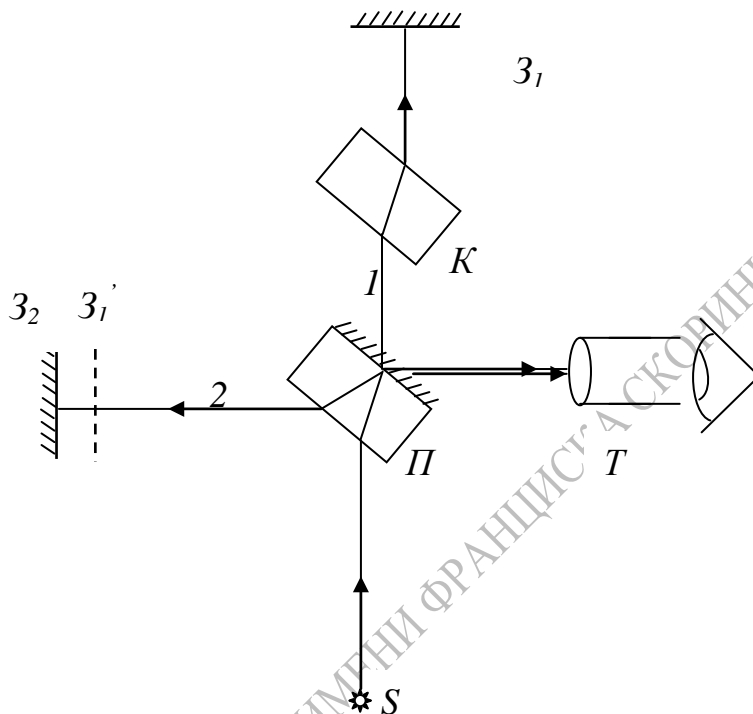


Рис. 9.1.

Встречаясь, оба луча интерферируют между собой и дают в фокальной плоскости зрительной трубы интерференционную картину. Так как второй луч проходит пластинку  $\Pi$  трижды, а первый луч только один раз, то на пути первого луча ставится компенсатор  $K$ . Компенсатор представляет собой плоскопараллельную пластинку такой же толщины, как и пластинка  $\Pi$ , но без напыления. Он служит для компенсации дополнительно оптической разности хода волн, возникающей при прохождении лучей через пластинку  $\Pi$ .

В микроинтерферометре Линника одно из зеркал заменено полированной поверхностью образца, чистоту обработки которого определяют.

Интерференционная картина в монохроматическом свете представляет собой чередование тёмных и светлых полос, форма которых в увеличенном масштабе воспроизводит профиль контролируемого участка поверхности (рис.9.2).

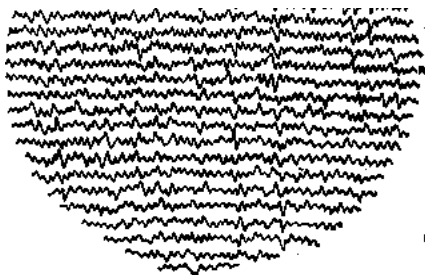


Рис. 9.2.

Принцип устройства микроинтерферометра В.П. Линника – сочетание интерферометра Майкельсона с измерительным микроскопом, что позволяет в поле зрения микроскопа наблюдать увеличенное в нужное число раз изображение интерференционной картины и измерять координатным методом вырисовывающиеся неровности с помощью обычного винтового окулярного микрометра. В местах выступов и впадин на исследуемой поверхности интерференционные полосы искривляются. Степень искривления полос и характеризует неровность поверхности.

На рис. 9.2 приведена интерферограмма поверхности, сфотографированная на микроинтерферометре Линника. Каждая интерференционная полоса на ней представляет собой изображение полосы профиля поверхности.

Высота  $h$  неровности поверхности определяется через искривление  $a$  и ширину  $b$  интерференционной полосы (см.рис 9.3):

$$h = \frac{m\lambda}{2} = \frac{a}{b} \frac{\lambda}{2} \quad (9.1)$$

где  $\lambda$  — средняя длина волны используемого участка спектра.

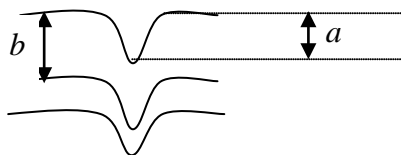


Рис. 9.3.

Для измерения величин  $a$  и  $b$  нить перекрестия окулярного измерительного микроскопа подводят к середине верхней интерференционной полосы и снимают по шкале барабана отсчет  $N_1$  (рис. 9.4). Затем нить перекрестия подводят к середине соседней нижележащей полосы и снимают отсчет  $N_2$ . Разность  $N_2 - N_1 = b$ . Если между отсчетами  $N_1$  и  $N_2$  расположено  $n$  полос, то

$$b = \frac{N_2 - N_1}{n} . \quad (9.2)$$

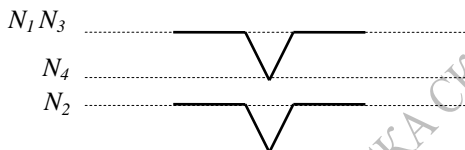


Рис. 9.4.

Для измерения изгиба  $a$  совмещают нить перекрестия с серединой полосы и по шкале окулярного микрометра снимают отсчет  $N_3$ . Затем нить перекрестия совмещают с серединой той же полосы в месте изгиба, получают отсчет  $N_4$ . Разность

$$N_4 - N_3 = a . \quad (9.3)$$

Величина изгиба в долях интервала выражается формулой

$$\Delta N = \frac{N_4 - N_3}{N_2 - N_1} n . \quad (9.4)$$

Подставляя (9.2) и (9.3) в (9.1), для  $h$  получим

$$h = \frac{N_4 - N_3}{N_2 - N_1} n \frac{\lambda}{2} . \quad (9.5)$$

Если измерения производятся не в монохроматическом, а в белом свете, то искривление в одну интерференционную полосу соответствует неровности на испытуемой поверхности, равной 0,27 мкм. Тогда  $h$  определяют по формуле

$$h = 0.27 * \Delta N = 0.27 \frac{N_4 - N_3}{N_2 - N_1} n . \quad (9.6)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

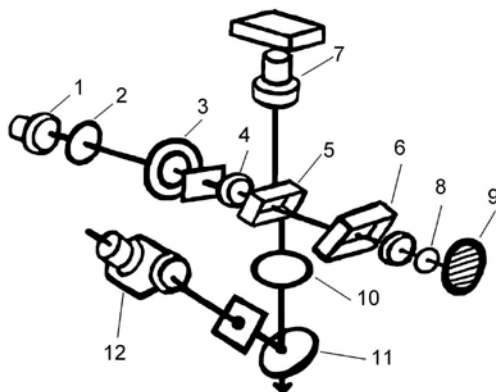


Рис. 9.5.

Оптическая схема интерферометра представлена на рис. 9.5. Свет от источника 1 через систему линз 2,3,4 параллельным пучком падает на разделительную пластинку 5. Пучок лучей, отраженный от пластинки 5, собирается в фокусе объектива 7 на исследуемой поверхности, после отражения от которой снова проходит через объектив 7, пластинку 5 и собирается в фокусе объектива 10, где наблюдается изображение исследуемой поверхности. Зеркало 11 направляет лучи в трубу.

Второй пучок лучей, пройдя через разделительную пластинку 5, падает на компенсатор 6, затем собирается в фокусе объектива 3 на эталонном зеркале 9, отражаясь от которого снова проходит через объектив 8, компенсатор 6 и падает на разделительную пластинку 5. Отражаясь от пластинки 5, часть лучей интерферирует с лучами первой ветви интерферометра, образуя резкое изображение интерференционных полос, которое объективом 10 переносится в фокальную плоскость окуляра 12. Таким образом, изображения интерференционных полос и исследуемой поверхности получаются в фокальной плоскости окуляра и налагаются друг на друга.



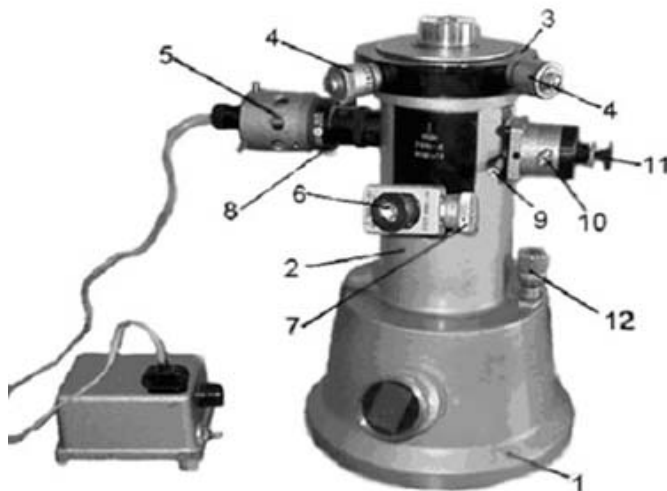


Рис. 9.6.

Микроинтерферометр Линника состоит (рис. 9.6) из круглого основания 1, цилиндрической колонки 2, несущего предметного столика 3, на котором устанавливается исследуемая деталь. Предметный столик с помощью микрометрических винтов 4 может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Цена деления барабана винта 0,005 мм. В колонке расположены осветитель 5, наблюдательный тубус 6 с объективом, на котором имеется кольцо 7. Вращением кольца можно вводить в оптическую систему и выводить из нее отражательное зеркало. При визуальном наблюдении зеркало должно быть введено в систему. С помощью горизонтальной выдвигающейся пластины 8 на пути световых лучей помещают светофильтры. На верхней части головки расположена рукоятка 9, при помощи которой на пути лучей помещают шторку. При включенной шторке лучи не попадают на объектив 6. Микроинтерферометр превращается в металлографический микроскоп. Ширина полос изменяется при помощи вращения вокруг своей оси винта 10. Изменение направления полос производится этим же винтом 10 путем вращения его вокруг оси всей интерференционной головки. Винт 11 служит для смещения интерференционных полос в поле зрения микроскопа. Фокусировка объектива на поверхность образца производится микрометрическим винтом 12.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Устанавливают образец на предметном столике 3 интерферометра исследуемой поверхностью вниз.

2. Поворачивают рукоятку 9 таким образом, чтобы стрелка стояла вертикально, и вращением микрометрического винта 12 фокусируют прибор на исследуемую поверхность.

3. Затем поворачивают рукоятку 9 так, чтобы стрелка стояла горизонтально, и включают объективную головку. В окуляр наблюдают интерференционные полосы. Поворотом винта 12 добиваются резкого изображения полос.

4. Винтовой окулярный микрометр, установленный на тубусе микроскопа, разворачивают так, чтобы одна из нитей перекрестия была направлена вдоль интерференционных полос, и закрепляют его зажимным винтом.

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Вычисление величины изгиба полос

1. Совмещают нить перекрестия подвижной сетки с серединой любой интерференционной полосы и снимают отсчет  $N_1$ . Затем совмещают эту же нить перекрестия с серединой другой полосы и снимают второй отсчет  $N_2$ . При этом необходимо заметить число интервалов между полосами  $n$ . Если полосы соседние, то  $n=1$ .
2. Совмещают одну из нитей перекрестия с серединой интерференционной полосы и по шкале окулярного микрометра снимают отсчет  $N_3$ . Затем нить перекрестия совмещают с серединой той же полосы в месте изгиба и производят второй отсчет  $N_4$ . По формуле (9.4) определяют величину изгиба полосы.

### УПРАЖНЕНИЕ II

#### Вычисление высоты неровности поверхности

1. Учитывая измеренную в предыдущем опыте величину  $\Delta N$ , по формуле (9.6) вычисляют высоту неровности поверхности.
2. С помощью выдвигающейся горизонтальной пластинки 8 на пути светового пучка помещают зеленый светофильтр с  $\lambda_2 = 561$  мкм, определяют для него  $\Delta N$  и вычисляют  $h$ .

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Определение чистоты обработки поверхности

Прибор МИИ-4 предназначен для измерения высоты неровностей на поверхностях от 10 до 14 класса по ГОСТ 2739-51.

1. Снимают с испытуемого участка целую серию измеряемых величин и определяют  $h_{cp}$ . Для снятия замеров столик перемещают микрометрическими винтами 4, имеющими диапазон перемещения, равный 10 мм.
2. По таблице по среднему значению  $h_{cp}$  определяют класс точности обработки поверхности детали. Ниже приведена таблица для определения классов обработки поверхности.

Классы	10	11	12	13	14
В мкм	от 0,50 до 0,80	от 0,25 до 0,50	от 0,12 до 0,25	от 0,06 до 0,12	до 0,06

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как возникают светлые и темные полосы в интерферометре Линника?
2. Какова роль компенсационной пластинки в интерферометре?
3. Как при работе с данным интерферометром повысить точность измерения?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ИТР-2 И ЖАМЕНА

Цель работы: научить студентов определять показатели преломления жидкостей и газов и исследовать зависимость показателя преломления воздуха от давления.

Приборы и принадлежности: интерферометр ИТР-2 с трансформатором питания, интерферометр Жамена, набор кювет и растворов исследуемых жидкостей, кюветы с исследуемым газом, манометр, насос, пипетка.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Интерферометр ИТР-2 работает по схеме Релея и предназначен для определения показателей преломления жидкостей и газов, а также определения концентрации растворов по разности показателей преломления эталонной и испытуемой жидкости. Оптическая схема его представлена на рис. 10.1 (вид сверху).

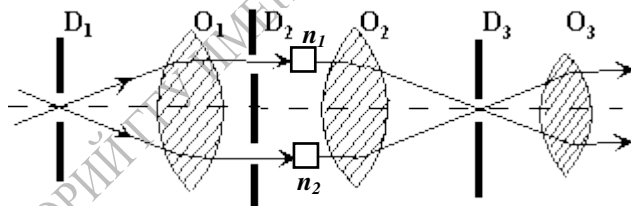


Рис. 10.1.

Параллельный пучок лучей, вышедший из коллиматора, состоящего из объектива  $O_1$  и узкой щели  $D_1$ , проходит через диафрагму с двумя отверстиями  $D_2$  и собирается в фокальной плоскости  $D_3$  объектива  $O_2$  зрительной трубы. Вследствие дифракции света на отверстиях диафрагмы  $D_2$  в плоскости  $D_3$  создается система интерференционных полос, которая наблюдается с помощью сильного окуляра  $O_3$ .

На пути лучей между объективами  $O_1$  и  $O_2$  против отверстий диафрагмы  $D_2$  ставится двухкамерная кювета, одна камера которой

заполняется эталонным, а другая испытываемым раствором. Появление дополнительной оптической разности хода между лучами, прошедшими через разные отверстия диафрагмы  $D_2$ , вследствие различия показателей преломления испытываемого и эталонного растворов приводит к смещению наблюдаемой в окуляр интерференционной картины.

Схема интерферометра ИТР-2 построена так, что нижние пучки лучей проходят под кюветами и образуют нижнюю неподвижную систему интерференционных полос. Верхние – проходят сквозь кюветы и образуют верхнюю подвижную систему полос. В случае, когда в обеих кюветах разность хода волн равна нулю, верхняя интерференционная система полос совпадает с нижней, неподвижной.

Пусть на пути лучей, выходящих из щелей, поставлены кюветы с различными веществами, показатели преломления которых  $n_1$  и  $n_2$ . Тогда верхняя система полос будет сдвинута относительно нижней за счет дополнительной разности хода волн на величину  $\Delta_0$ , равную

$$\Delta_0 = n_1 l - n_2 l = (n_1 - n_2) l, \quad (10.1)$$

где  $l$  – длина кюветы.

Для возвращения верхней интерференционной системы в прежнее положение применяют компенсационный метод. Метод компенсации (нулевой метод) заключается в том, что для того, чтобы вернуть интерференционную картину в прежнее положение (т.е. совместить верхнюю и нижнюю системы полос), необходимо увеличить оптический путь одного из лучей. Имеется ввиду тот луч, который проходит через кювету с жидкостью, имеющий меньший показатель преломления. Для этого на пути этого луча помещают компенсационную пластинку переменной толщины  $h$ , вносящую дополнительную разность хода волн

$$\Delta_1 = n_{II} h, \quad (10.2)$$

где  $n_{II}$  – показатель преломления пластины.

Передвигая пластинку, можно добиться такого ее положения, при котором разность хода, даваемая кюветами и пластиной, равна нулю, то есть

$$\Delta_0 - \Delta_1 = 0. \quad (10.3)$$

Тогда с учетом формул (10.1) и (10.2) и уравнения (10.3) получим

$$n_1 - n_2 = \frac{n_{II} h}{l}, \quad (10.4)$$

где  $n_2$  – показатель преломления эталонной жидкости,  $l$  – длина кюветы,  $n_{II}$  – показатель преломления компенсационной пластинки,  $h$  – ее толщина.

Толщина вводимой компенсационной пластины непосредственно связана с оборотами микрометрического винта.

Микрометрический винт компенсатора проградуирован так, что поворот на одно деление изменяет оптическую разность хода волн на  $1/30 \lambda$ . Если смещение достигается поворотом на  $N$  делений, то

$$\Delta_1 = \frac{N\lambda}{30}. \quad (10.5)$$

Сравнивая выражения (10.1) и (10.5) с учетом (10.3), получаем

$$n_1 = n_2 + \frac{N\lambda}{30l}, \quad (10.6)$$

где  $n_1$  – показатель преломления исследуемой жидкости;  $n_2$  – показатель преломления эталонной жидкости;  $N$  – число делений, на которое повернут барабан;  $\lambda$  – длина волны;  $l$  – длина кюветы.

Главной частью интерферометра Жамена являются две одинаковые толстые стеклянные плоскопараллельные пластины  $II_1$  и  $II_2$ , посеребренные с одной стороны. Пластины  $II_1$  и  $II_2$  располагаются в приборе под малым углом друг к другу. Ход лучей в интерферометре Жамена показан на рис. 10.2.

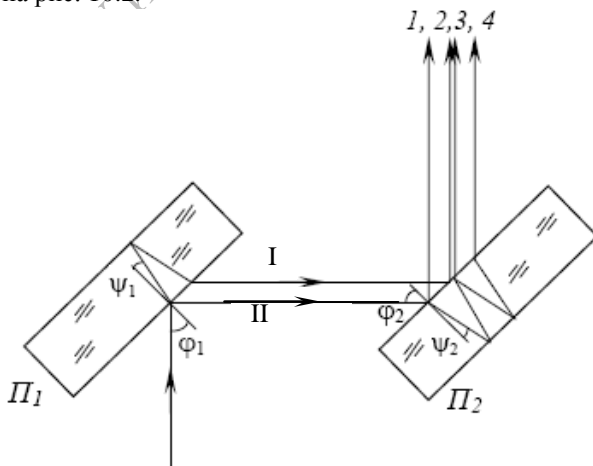


Рис. 10.2.

При падении пучка света на первую пластинку  $P_1$  часть лучей отразится от передней грани пластинки, а часть, преломившись, отразится от задней грани. Из первой пластинки выйдут два пучка, идущих на некотором расстоянии друг от друга. Каждый пучок, попадая на вторую пластинку  $P_2$ , опять раздвоится, и из второй пластинки выйдут уже четыре пучка, но так, что второй и третий наложатся друг на друга.

Между любой парой лучей, за исключением лучей 2 и 3, имеется значительная разность хода, обусловленная различным числом прохождений через толщу пластинок  $P_1$  и  $P_2$ . Эта разность хода составляет несколько сантиметров, так что при использовании белого света, интерференции между этими лучами не наблюдается. Интерференционные явления возникают только при суперпозиции лучей 2 и 3; присутствие лучей 1 и 4 ухудшает четкость интерференционной картины, и поэтому их устраняют с помощью диафрагм.

Разность хода луче 2 и 3 равна

$$\Delta = 2hn(\cos\psi_2 - \cos\psi_1)$$

где  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – углы преломления лучей в первой и второй пластинке. Если пластинки  $P_1$  и  $P_2$  одинаковы и установлены строго параллельно друг другу, т.е.  $\psi_1 = \psi_2$ , то разность хода рассматриваемых лучей будет равна нулю. На практике пластинки устанавливаются под очень малым углом.

Пусть на пути лучей I и II поместили две кюветы, в одной из которых находится эталонный газ или воздух с известным показателем преломления  $n_2$ , а в другой – исследуемый газ или разреженный воздух с показателем преломления  $n_1$ .

Тогда возникает дополнительная разность хода волн, которая приводит к смещению интерференционной картины в поле зрительной трубы на  $m$  полос. Для возвращения интерференционной картины в прежнее положение на пути луча, проходящего через кювету с показателем преломления  $n_2$ , помещают компенсационную пластинку толщиной  $h$  и показателем преломления  $n_{II}$ . В этом случае выполняется условие (10.3), и показатель преломления неизвестной среды находят по формуле (10.4).

Изменяя угол наклона компенсационной пластины с помощью микрометрического винта, мы тем самым изменяем эффективную толщину  $h$ , которая вводится на пути луча. Таким образом, оптическая

разность хода волн  $\Delta$ , вносимая компенсационной пластиной, является функцией эффективной толщины  $h$ , величину которой мы меняем за счет наклона пластины с помощью микрометрического винта с числом делений  $N$ , то есть  $\Delta = f(N)$ .

Показатель преломления газа (воздуха)  $n_2$  зависит от давления  $P$ . Изменяя давление газовой смеси, мы тем самым будем изменять показатель преломления, то есть наблюдать зависимость  $\Delta n = f(\Delta P)$ .

Молекулярная оптика устанавливает следующее соотношение между показателем преломления газа и его плотностью

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 + N\alpha} \approx 1 + \frac{N\alpha}{2}, \quad (10.7)$$

где  $N$  – число молекул в единице объема,  $\alpha$  – поляризуемость молекулы – коэффициент пропорциональности между дипольным моментом  $p$  молекулы и напряженностью электрического поля  $E$  ( $p = \alpha \varepsilon_0 E$ ),  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Принимая во внимание соотношение

$$P = NkT,$$

где  $P$  – давление в газе,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура, получим

$$n - 1 = \frac{\alpha}{2kT} P. \quad (10.8)$$

Из выражения (10.8) следует, что при постоянной температуре изменение показателя преломления  $\Delta n$  пропорционально изменению давления  $\Delta P$ :

$$\Delta n = \frac{\alpha}{2kT} \Delta P \quad (10.9)$$

Величина  $\Delta n$  измеряется с помощью интерферометра Жамена,  $\Delta P$  – с помощью манометра. Одновременное измерение этих величин и температуры позволяет определить поляризуемость молекул воздуха

$$\alpha = 2kT \frac{\Delta n}{\Delta P} \quad (10.10)$$

и, следовательно, рассчитать по формуле (10.8) показатель преломления воздуха для любых значений давления и температуры.

Необходимо отметить, что воздух является смесью нескольких газов, поэтому под поляризуемостью молекул воздуха нужно понимать некоторую среднюю величину, определяемую соотношением



$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_i \alpha_i N_i,$$

$\alpha_i$  и  $N_i$  – поляризуемость и концентрация молекул различных газов, входящих в состав воздуха,  $N$  – общее число молекул в единице объема.

Из (10.8) следует, что

$$\frac{\alpha}{2k} = \frac{(n-1)T}{P}. \quad (10.11)$$

При температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  выражение (10.11) принимает вид

$$\frac{\alpha}{2k} = \frac{(n_0 - 1)T_0}{P_0}. \quad (10.12)$$

Разделив (10.11) на (10.12), получаем

$$1 = \frac{(n-1)TP_0}{(n_0 - 1)T_0 P}.$$

Отсюда

$$n_0 - 1 = \frac{(n-1)TP_0}{PT_0}. \quad (10.13)$$

Выражение (10.13) позволяет установить связь показателя преломления газа  $n$  при температуре  $T$  и давлении  $P$  с показателем преломления  $n_0$  при нормальных условиях ( $P_0 = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ ).

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

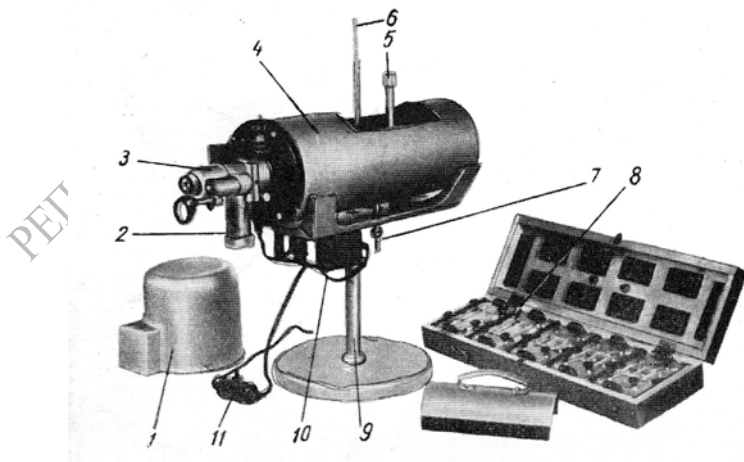


Рис. 10.3.

Интерферометр ИТР-2 (рис.10.3) состоит из следующих основных узлов: верхней крышки 1, которая накрывает микрометрическое отсчётное устройство 2 и зрительную трубу 3, кожуха 4 с двойными стенками, термометра 5, мешалки 6, крана для слива воды из термокамеры 7, набора кювет 8, подставки 9, трансформатора 10, выключателя 11.

Интерферометр Жамена состоит из двух толстостенных стеклянных пластин  $P_1$  и  $P_2$ , между которыми помещают кюветы с разными показателями преломления газа (воздуха). На пути луча, проходящего через кювету с меньшим показателем преломления газа, помещают компенсационную пластину. Наблюдение интерференционных полос проводят через зрительную трубу. При этом следует помнить, что в центре картины наблюдается белая полоса нулевого порядка. По обе стороны от нее расположены два минимума. Далее следует система окрашенных полос, четкость которых постепенно ухудшается.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

Включают интерферометр ИТР-2 в сеть и тщательно перемешивают воду мешалкой в термокамере. Наблюдая через окуляр, вращением микрометрического винта добиваются совмещения нижней и верхней интерференционной картины. Снимают отсчет по барабану. Это и будет нулевой отсчет. В дальнейшем все отсчеты следует производить от него.

### **УПРАЖНЕНИЕ I**

#### **Определение показателя преломления неизвестного раствора**

1. В одной из кювет оставляют растворитель (дистиллированную воду), а в другую с помощью пипетки наливают раствор этилового спирта. Жидкостью заполняют не более  $3/4$  объема кювет. Отделения кювет закрываются крышками с упругими держателями.
2. Помещают кюветы в термокамеру и с помощью мешалки добиваются уравнивания температур, которое определяют по четкой интерференционной картине.
3. Через окуляр наблюдают смещение интерференционной картины. Вращением барабана микрометрического винта добиваются совмещения обеих интерференционных картин по нулевой полосе.

4. По шкале барабана снимают отсчет  $N$ , соответствующий этому положению.
5. По формуле (10.6) вычисляют неизвестный показатель преломления раствора  $n_{x_1}$  ( $\lambda = 500$  нм,  $n = 1,33$ ).
6. Аналогичные измерения проводят для раствора изопропилового спирта при длине кюветы  $l = 5$  см и по формуле (10.6) вычисляют показатель преломления  $n_{x_2}$ .
7. Сопоставляют полученные результаты и делают выводы.

### **Работа с интерферометром Жамена**

Вся система интерферометра полностью отъюстирована и никакой регулировке не подлежит. Для четкого видения интерференционной картины на нее фокусируют окуляр зрительной трубы.

### **УПРАЖНЕНИЕ II**

#### **Градуировка компенсатора**

1. Включают прибор в сеть.
2. Фокусируют зрительную трубу на четкое видение интерференционной картины.
3. Совмещают нулевую полосу с перекрестием нитей в окуляре зрительной трубы.
4. Отмечают отсчет нулевого деления микрометрического винта компенсатора.
5. Вращая винт компенсатора, последовательно совмещают с крестом нитей первую, вторую и последующие полосы интерференционной картины и записывают отсчеты. При смещении интерференционной картины на одну полосу разность хода меняется на одну длину волны. При градуировке нужно использовать все полосы, наблюдаемые в окуляр зрительной трубы.
6. Строят график зависимости  $\Delta$  (оптической разности хода волн) от  $N$  (числа делений винта компенсатора) и делают вывод.

### **УПРАЖНЕНИЕ III**

#### **Исследование зависимости $\Delta n$ от $\Delta P$**

1. Помещают на пути интерферирующих лучей кювету с эталонным газом (воздухом) и кювету с разреженным воздухом, соединенную с насосом и манометром.

2. Увеличивают давление в кювете на величину  $\Delta P_1 = 0,25P$  атм. и наблюдают через зрительную трубу смещение интерференционных полос.
3. Вращением винта компенсатора вновь совмещают середину нулевой полосы с перекрестием нитей в окуляре зрительной трубы и снимают отсчет  $N_1$ .
4. По градуировочному графику определяют  $\Delta_1$ , соответствующее  $N_1$ , и вычисляют  $\Delta n_1 = \frac{\Delta_1}{l}$ , где  $l$  - длина кюветы.
5. Вновь увеличивают давление на величину  $\Delta P_2 = 0,5P$  атм и вычисляют  $\Delta n_2$  и т.д.
6. Затем в кювете создают разрежение, то есть уменьшают давление от атмосферного на величину  $\Delta P'_1 = 0,25P$  атм и вычисляют  $\Delta n'_1$  по методике, описанной выше.
7. Аналогично отсчеты снимают при других значениях разреженного давления и вычисляют  $\Delta n'_2, \Delta n'_n$  и т. д.
8. Строят график зависимости  $\Delta n = f(\Delta P)$  и делают выводы.

#### **УПРАЖНЕНИЕ IV**

##### **Определение поляризуемости газовой смеси и ее показателя преломления.**

1. Пользуясь графиком, полученным в упражнении III, по формуле (10.10) находят поляризуемость газовой смеси.
2. По формуле (10.8) рассчитывают показатели преломления при давлениях, использованных в опыте, и строят график зависимости  $\Delta n_1 = f(\Delta P)$ .
3. Измерив комнатную температуру и давление по барометру при данной температуре, по формуле (10.13) вычисляют показатель преломления воздуха при нормальных условиях.
4. По формуле (10.10) определяют поляризуемость воздуха.

#### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Основные типы используемых интерферометров и их принципиальные схемы.
2. Почему пластинки в интерферометре Жамена должны быть достаточно толстыми (не менее 2-3 см)?
3. Могут ли эти пластинки сильно отличаться по толщине?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

### ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА ПРИ ПОМОЩИ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: а) наблюдение дифракции на различных объектах; б) исследование дифракции на одномерной и двумерной решетках.

Приборы и принадлежности: газовый лазер, набор дифракционных объектов, экран, фотоэлемент, микроамперметр.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения света, если оно не может быть истолковано как результат отражения, преломления света на границе двух сред или изгибания световых лучей в средах с непрерывно меняющимся показателем преломления. Если в среде имеются мельчайшие частицы постороннего вещества (например, туман) или показатель преломления заметно меняется на расстояниях порядка длины волны, то в этих случаях говорят о рассеянии света и термин «дифракция» не используется.

Таким образом дифракция света в узком (наиболее употребительном) смысле – явление огибания световыми волнами контура непрозрачных тел, и следовательно, проникновение света в область геометрической тени; в широком смысле – проявление волновых свойств света в условиях, близких к условиям применимости представлений геометрической оптики.

Первая элементарная количественная теория дифракции света была разработана французским физиком О. Френелем, который объяснил её как результат интерференции вторичных волн.

Метод состоит в разбиении фронта падающей волны, обрезанного краями экрана, на зоны Френеля. Считается, что на экране вторичные световые волны не рождаются и световое поле в точке наблюдения определяется суммой вкладов от всех зон. Если отверстие в экране оставляет открытым чётное число зон (рис. 11.1), то в центре дифракционной картины получается тёмное пятно, при нечётном числе зон — светлое. В центре тени от круглого экрана, закрывающего не слишком большое число зон Френеля, получается светлое пятно. Величины вкладов зон в световое поле в точке

наблюдения пропорциональны площадям зон и медленно убывают с ростом номера зоны. Соседние зоны вносят вклады противоположных знаков, т. к. фазы излучаемых ими волн противоположны.

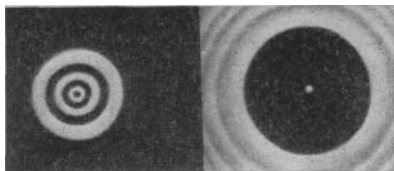


Рис. 11.1

Дифракционные кольца при прохождении света: слева — через круглое отверстие, в котором укладывается чётное число зон; справа — вокруг круглого экрана.

Явления дифракции принято классифицировать в зависимости от расстояний источника и точки наблюдения (экрана) от препятствия, поставленного на пути распространения света. Если эти расстояния очень велики (бесконечно велики), то дифракция называется дифракцией в параллельных лучах или дифракцией Фраунгофера. В противоположном случае говорят о дифракции в непараллельных лучах или дифракции Френеля.

Метод Френеля эффективен лишь тогда, когда размер отверстия сравним с размером зоны Френеля (дифракция в сходящихся лучах). В этом случае небольшое число зон, на которые разбивается сферическая волна в отверстии, определяет картину дифракции света. Если отверстие в экране меньше зоны Френеля (дифракция Фраунгофера), как, например, при очень удалённых от экрана наблюдателя и источника света, то можно пренебречь кривизной фронта волны, считать её плоской и картину дифракции характеризовать угловым распределением интенсивности потока. При этом падающий параллельный пучок света на отверстии становится

расходящимся с углом расходимости  $\varphi \sim \lambda/b$ . При освещении щели параллельным монохроматическим пучком света на экране получается ряд тёмных и светлых полос, быстро убывающих по интенсивности. Если свет падает перпендикулярно к плоскости щели, то полосы расположены симметрично относительно центральной полосы (рис. 11.2), а освещённость

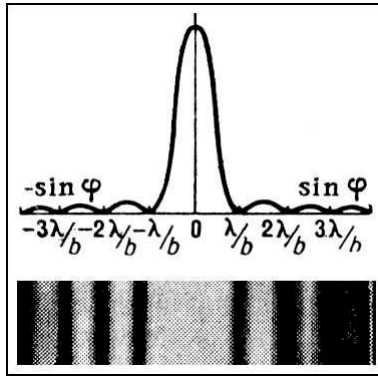


Рис. 11.2. Дифракция Фраунгофера на щели.

меняется вдоль экрана периодически с изменением  $\varphi$ , обращаясь в нуль при углах  $\varphi$ , для которых

$$b \sin \varphi = m\lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots). \quad (11.1)$$

При промежуточных значениях  $\varphi$  освещённость достигает максимальных значений. Главный максимум имеет место при  $m=0$  и  $\sin \varphi = 0$ , т. е.  $\varphi = 0$ . С уменьшением ширины щели центральная светлая полоса расширяется, а при данной ширине щели положение минимумов и максимумов зависит от  $\lambda$ , т. е. расстояние между полосами тем больше, чем больше  $\lambda$ . Поэтому в случае белого света имеет место совокупность соответствующих картин для разных цветов; главный максимум будет общим для всех  $\lambda$  и представляется в виде белой полоски, переходящей в цветные полосы с чередованием цветов от фиолетового к красному.

Если имеются 2 идентичные параллельные щели, то они дают одинаковые накладывающиеся друг на друга дифракционные картины, вследствие чего максимумы соответственно усиливаются, а кроме того, происходит взаимная интерференция волн от первой и второй щелей, значительно осложняющая картину. В результате минимумы будут на прежних местах, т.к. это те направления, по которым ни одна из щелей не посылает света. Таким образом, прежние минимумы определяются условиями:

$$b \sin \varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots,$$

добавочные минимумы удовлетворяют соотношению

$$d \sin \varphi = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$$

( $d$  — размер щели шириной  $b$  вместе с непрозрачным промежутком шириной  $a$ ), для главных максимумов выполняется условие

$$d \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, \quad (11.2)$$

т. е. между двумя главными максимумами располагается один добавочный минимум, а максимумы становятся более узкими, чем при одной щели. Увеличение числа щелей делает это явление ещё более отчётливым .

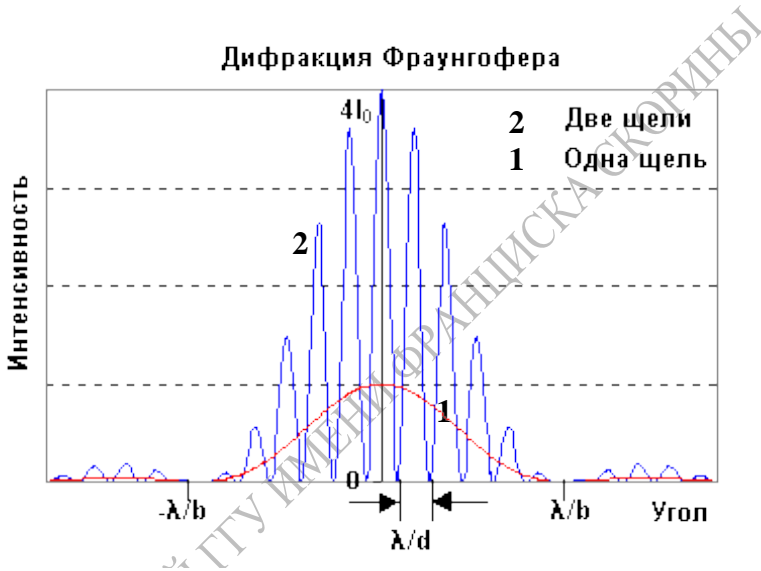


Рис. 11.3.

Дифракционная решётка представляет собой периодическую структуру: штрихи с определённым и постоянным для данной решётки профилем повторяются через строго одинаковый промежуток  $d$ , называемый периодом дифракционной решетки (рис.11.4). Главные максимумы определяются условием

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

Если штрихи нанесены на плоскую поверхность, то дифракционные решетки называются плоскими, если на вогнутую (обычно сферическую) поверхность — вогнутыми. Различают отражательные и прозрачные дифракционные решетки. У отражательных штрихи наносятся на зеркальную (обычно металлическую) поверхность и наблюдение ведётся в отражённом



свете. У прозрачных штрихи наносятся на поверхность прозрачной (обычно стеклянной) пластинки (или вырезаются в виде узких щелей в непрозрачном экране), и наблюдение ведётся в проходящем свете.

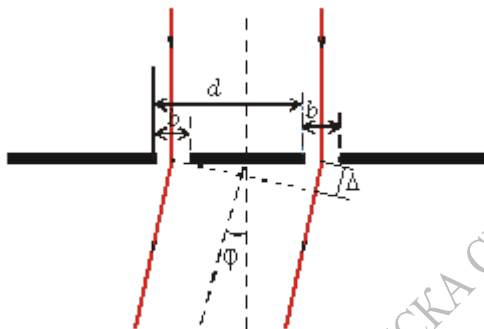


Рис.11.4

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Источником света в работе служит гелий-неоновый лазер ( $\lambda=632,8$  нм). В качестве объектов исследования используют регулируемую щель, экраны с круглыми и прямоугольными отверстиями, нити, одномерные и двумерные дифракционные решетки. Дифракционную картину наблюдают на экране.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Наблюдение дифракции Фраунгофера на щели

1. На выходе лазерного луча поместить штатив со щелью. Меняя ширину щели, пронаблюдать зависимость вида дифракционной картины от ширины щели. Зарисовать картину и сделать выводы.
2. Выбрав ширину щели 0,02 мм, определить положение нескольких минимумов относительно центра картины.  
Проверить удовлетворение формуле

$$x_{\min} = \frac{L\lambda}{a} m, \quad (11.3)$$

где  $L$  – расстояние от щели до экрана,  $a$  – ширина щели,  $m$  – порядок дифракционного минимума.

Формула применима для небольших углов дифракции  $\varphi$  :

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_{\min}}{L}$$

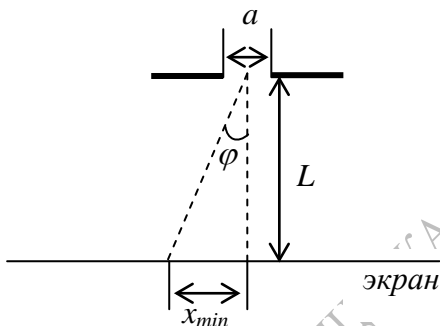


Рис.11.5

3. Расстояние между соседними минимумами определить по формуле

$$\Delta x_{\min} = \frac{L\lambda}{a} \quad (11.4)$$

Определив координаты минимумов и расстояние между соседними минимумами, оценить ширину щели:

$$a = \frac{L\lambda}{\Delta x_{\min}} .$$

Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№ п/п	X(мм)		$x_{\min} = \frac{ x _{лев} +  x _{пр}}{2}$ (мм)	$\Delta x_{\min}$ (мм)	a (мм)
	слева	справа			
1					
2					
3					

**УПРАЖНЕНИЕ II**  
**Наблюдение дифракции на отверстиях**  
**различной формы**

Поместить на выходе лазерного луча поочередно экраны с прямоугольными и круглыми отверстиями, нити различной толщины. Нарисовать наблюдаемые дифракционные картины, сравнить и сделать выводы.

**УПРАЖНЕНИЕ III**  
**Дифракция Фраунгофера на одномерной решетке**

1. Поместить на выходе лазерного луча одномерную дифракционную решетку и определить положения нескольких максимумов относительно центрального (нулевого) максимума.
2. Определить длину волны излучения газового лазера по формуле

$$\lambda = \frac{x_{\max} d}{mL}, \quad (11.5)$$

где  $X_{\max}$  – координата наблюдаемого максимума относительно центрального,  $d$  – постоянная решетки,  $L$  – расстояние от решетки до экрана,  $m$  – порядок максимума.

Результаты опыта занести в таблицу 2.

Таблица 2.

№ п/п	X, мм		$X_{\min} = \frac{ X _{\text{лев}} +  X _{\text{пр}}}{2}$ , мм	L, мм	$\lambda$ , нм	$\bar{\lambda}$ , нм	$\Delta\bar{\lambda}$ , нм	$\varepsilon$
	слева	справа						
1								
2								
3								

**УПРАЖНЕНИЕ IV**  
**Дифракция Фраунгофера на двумерной решетке**

1. Расположить на выходе лазерного луча держатель с набором двумерных дифракционных решеток. Получить дифракционную картину и определить координаты и порядок дифракционных максимумов на экране.
2. Рассчитать углы дифракции  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  по расстоянию до экрана  $L$  и координатам максимумов ( $X_{\max}$  и  $Y_{\max}$ ). Из условия главных максимумов определить периоды двумерных решеток.

Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3.

Порядок макси- мум m	направление x					направление y				
	$X_{\max}$	L	$\varphi_x$	$d_x$	$\bar{d}_x$	$Y_{\max}$	L	$\varphi_y$	$d_y$	$\bar{d}_y$
1										
2										
3										

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля.
2. Дифракция Фраунгофера на щели.
3. Дифракционная решетка и ее свойства. Двумерная решетка. Дифракционная решетка как спектральный прибор.
4. Принцип генерации света в оптических квантовых генераторах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

### ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА ФРАУНГОФЕРА И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Цель работы: познакомить студентов с дифракцией Фраунгофера, измерить периоды решеток, изучить последовательность формирования линзой оптического изображения и осуществить пространственную фильтрацию изображения.

Приборы и принадлежности: дифрактометр ИФ-124, микроскоп МБИ-1, дифракционная насадка, репродукционная насадка, одномерные и двумерные объекты, объективный микрометр, щель в круглой оправе.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Дифракция волн, в первоначальном узком смысле – огибание волнами препятствий, в современном более широком смысле – любое отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики. При таком общем толковании дифракция волн переплетается с явлениями распространения и рассеяния волн в неоднородных средах (см. также теоретическое обоснование к работе №11).

Дифракция Фраунгофера - это дифракция на отверстиях, которое для точки наблюдения открывает заметно меньше первой зоны Френеля. Это условие выполнено, если точка наблюдения и источник света находятся достаточно далеко от отверстия.

Дифракция Френеля - это дифракция в случае, когда отверстие открывает (или препятствие закрывает) для точки наблюдения несколько зон Френеля. Если открыто много зон Френеля, то дифракцией можно пренебречь, и являются применимыми законы геометрической оптики.

Дифракционная решётка - оптический прибор, предназначенный для анализа спектрального состава оптического излучения. Дифракционная решётка состоит из тысяч узких и близко расположенных щелей. Из-за интерференции интенсивность света, прошедшего через дифракционную решётку, различна в различных направлениях. Имеются выделенные направления, в которых световые волны от различных щелей решётки складываются в фазе, многократно усиливая друг друга. При освещении решётки монохроматическим светом на её выходе наблюдаются узкие лучи с

большой интенсивностью. Так как направления на интерференционные максимумы зависят от длины волны, белый свет, прошедший через дифракционную решётку, будет расщепляться на множество лучей разного цвета. Таким образом мы можем исследовать спектральный состав света. Выражение для интерференционных максимумов одинаково для пары щелей и дифракционной решётки, но в последнем случае максимум оказывается намного более острым и интенсивным, обеспечивая высокое разрешение в спектроскопических исследованиях.

Рассмотрим дифракцию света на пространственной структуре, которая может представлять собой систему неоднородностей, расположенных периодически. В этом случае волна распространяется в среде, в которой имеются участки, где скорость света отличается от скорости в остальных участках среды.

Пусть решетка образована рядом одинаковых рассеивающих центров, расположенных вдоль прямой  $MM'$  на расстоянии  $d$  друг от друга (рис. 12.1).

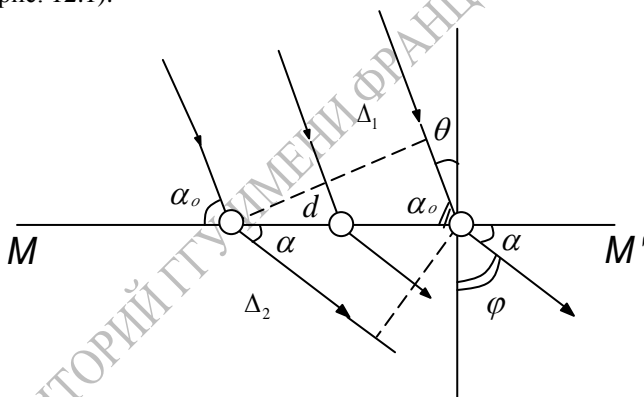


Рис. 12.1.

Такую решетку называют одномерной. Направим на решетку под углом  $\theta$  пучок параллельных когерентных лучей. Из лучей, рассеиваемых центрами, выберем лучи, которые составляют с нормалью угол  $\varphi$ . Разность хода  $\Delta$  между соседними лучами равна

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = d \sin \theta - d \sin \varphi.$$

Главные максимумы возникают при условии, что  $\Delta = m\lambda$ .

Тогда

$$d (\sin \theta - \sin \varphi) = m_1 \lambda, \quad (12.1)$$

где  $m_1 = 0, 1, 2, 3, \dots$ .

Для упрощения дальнейшего рассмотрения вопроса введем вместо углов  $\theta$  и  $\varphi$  дополняющие к ним углы  $a_0$  и  $a$ . Тогда равенство (12.1) примет вид:

$$d (\cos a_0 - \cos a) = m_1 \lambda . \quad (12.2)$$

Совокупность лучей, параллельных образующей конуса, ось которого совпадает с направлением  $MM'$ , соответствует постоянному значению угла  $a$ . Выделим те лучи, которые параллельны одной из образующих конуса и лежат в плоскости чертежа (рис. 12.2).

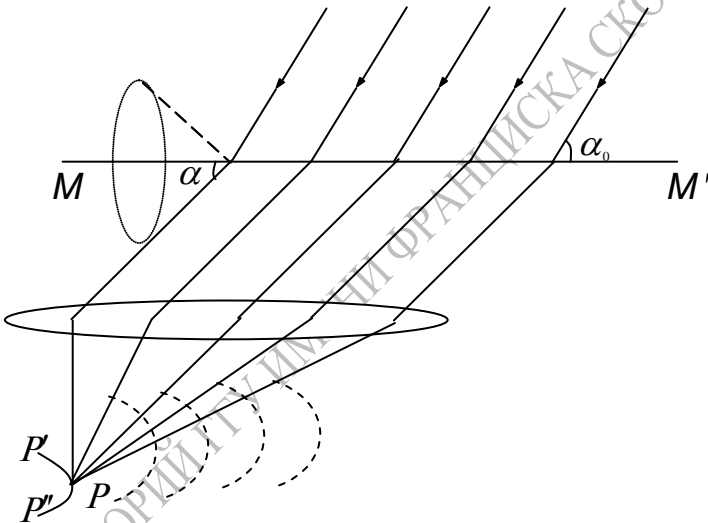


Рис. 12.2.

При выполнении условия (12.2) эти лучи усилят друг друга, вследствие чего в фокальной плоскости линзы появится светлое пятно  $P$ . Лучи, параллельные другим образующим, дадут свои светлые пятна, и на экране возникнет светлая полоса  $p'pp''$ .

Если  $a_0 = \frac{\pi}{2}$ , то значению  $a = \frac{\pi}{2}$  соответствует светлая полоса нулевого порядка, которая будет иметь вид прямой. Для нее  $m_1=0$ . По

обе стороны от нее расположатся гиперболы разных порядков (рис. 12.3).

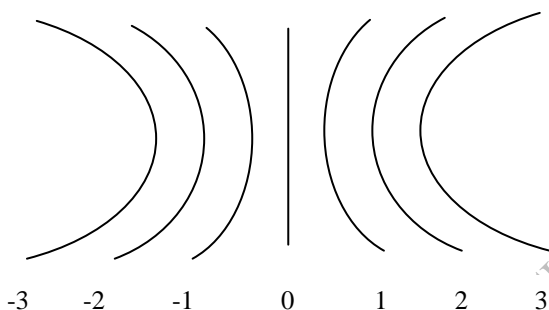


Рис. 12.3.

Для них  $m_1 = \pm 1, \pm 2, \dots$ . При большом количестве рассеивающих центров полосы получаются очень узкими.

Рассмотрим теперь решетку, в которой рассеивающие центры находятся в узлах квадратной решетки, представляющей собой две системы линейных решеток, наложенных друг на друга (рис. 12.4). Пусть, для простоты, периоды решеток одинаковы и равны  $d$ .

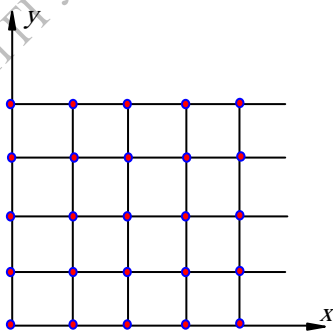


Рис. 12.4.

Тогда максимумы образуются для тех направлений, для которых рассеянные от центров лучи под углами  $\alpha$  и  $\beta$  будут удовлетворять условиям



$$\begin{aligned}d(\cos \alpha_0 - \cos \alpha) &= m_1 \lambda \\d(\cos \beta_0 - \cos \beta) &= m_2 \lambda\end{aligned}\quad (12.3)$$

где  $m_1, m_2$  – целые числа.

Как следует из условия (12.3), в фокальной плоскости линзы для каждого уровня образуется своя система гипербол. Оба условия (12.3) будут выполняться для тех точек, в которых гиперболы пересекаются во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 12.5).

Если на двумерную решетку падает монохроматический свет, дифракционная картина будет иметь вид чередующихся светлых пятен. Если же на решетку падает не монохроматический свет, то каждое пятно растянется в спектр.

В качестве модели дифракционной решетки может служить сетка с очень мелкими ячейками, которая при падении излучения газового лазера дает хорошую дифракционную картину. Если же такую решетку (сетку) осветить излучением газового лазера, а после нее поставить линзу, то в фокальной плоскости линзы наблюдается дифракционная картина, а в плоскости наблюдения мы получим изображение сетки.

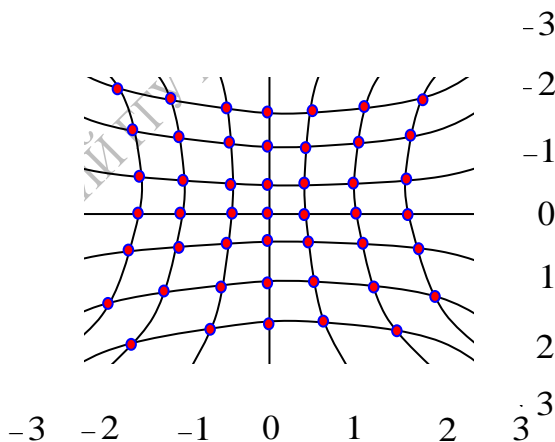


Рис. 12.5.

Изображение или фотоснимок математически может быть описан набором синусоидальных составляющих распределения оптической плотности с различными амплитудами и пространственными частотами. При этом распределение плотности почернений на снимке можно представить набором синусоидальных дифракционных решеток с разной ориентацией, контрастом и периодом.

Если на такой снимок падает сложный световой импульс, то он может быть разложен по теореме Фурье на монохроматические составляющие. Согласно этой теореме функция может быть представлена с какой угодно точностью в виде суммы синусоидальных и косинусоидальных функций с соответственно подобранными амплитудами, периодами и начальными фазами.

При этом, если исходная функция  $f(t)$  периодична (с периодом  $T$ ), то периоды слагающих синусов и косинусов находятся в простом кратном отношении  $T, \frac{1}{2} T, \frac{1}{3} T, \frac{1}{4} T, \dots$ , представленные в виде ряда Фурье:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp \left[ i \omega_n t \right],$$

где  $\omega_n = n \omega_0 = n \frac{2\pi}{T}$  – круговая частота  $n$ -ой гармонической составляющей,  $C_n$  – комплексная амплитуда  $n$ -ой гармоники

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp \left[ -i \omega_n t \right] dt.$$

Совокупность коэффициентов  $C_n$  называют спектром функции  $f(t)$ .

Если же функция не периодична, то в разложении находятся не только кратные, но и все возможные периоды, представленные в виде интеграла Фурье. Хорошее приближение получается, если ограничиться даже небольшим числом членов ряда Фурье.

Для этих синусоидальных и косинусоидальных составляющих угол дифракции, определяемый периодом синусоидальных решеток фотоснимка и длиной световой волны, будет различным. По распределению и виду дифракционных максимумов, используя

дифрактометр, можно найти распределение периодических структур в исследуемом фотоснимке по пространственным периодам.

Дифракционное образование изображения сводится к двум стадиям:

1) формированию в фокальной плоскости линзы дифракционной картины предмета;

2) преобразованию дифракционной картины предмета в фокальной плоскости линзы в изображение предмета в плоскости изображений.

Вся информация, имеющаяся в изображении предмета, содержится также и в дифракционной картине предмета. Поэтому, если усилить или ослабить отдельные максимумы, то произойдут соответствующие изменения в изображении предмета. Внесение изменений в дифракционную картину предмета, вызывающих соответствующие изменения в изображении предмета, называется пространственной фильтрацией изображения.

Первым экспериментом, продемонстрировавшим возможность пространственной фильтрации изображения, был опыт Аббе-Портера. В этом опыте металлическая сетка  $S$ , образованная проволоками, пересекающимися под прямым углом, освещалась параллельным пучком света. Сетка размещалась перед линзой  $L$ . В фокальной плоскости линзы на расстоянии  $F$  от оптического центра линзы образовывалась дифракционная картина изображения (рис. 12.6).

В плоскости наблюдения на расстоянии  $f$  от центра линзы формируется изображение сетки  $S_1$ . Если в фокальную плоскость  $F$  линзы ввести непрозрачный экран с горизонтально расположенной щелью, то в плоскости наблюдения в изображении сетки будут присутствовать только вертикальные линии.

Повернув непрозрачный экран в фокальной плоскости линзы на  $90^\circ$  градусов так, чтобы щель расположилась вертикально, мы в изображении сетки видим только горизонтальные линии.

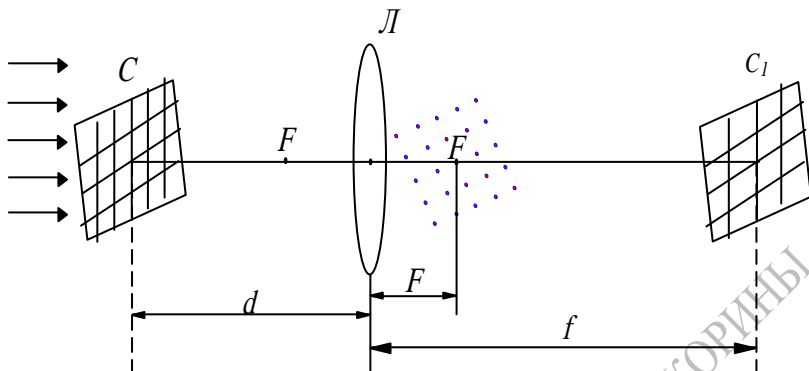


Рис. 12.6.

Таким образом, горизонтальные составляющие дифракционной картины предмета ответственны за образование вертикальных составляющих изображения предмета и, наоборот, вертикальные составляющие дифракционной картины в фокальной плоскости линзы ответственны за образование горизонтальных составляющих изображения предмета.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из дифрактометра ИФ-124, блока питания, газового лазера ЛГН-208Л, исследуемого объекта (капроновая сетка), объективного микрометра, микроскопа МБИ-1, щели для пространственной фильтрации изображения, линзы со шкалой делений.

Дифрактометр ИФ-124 (рис. 12.7) предназначен для исследования спектра пространственных частот электронно-микроскопических и других изображений, зарегистрированных на негативных фотоматериалах.

Он может использоваться для анализа светорассеивающих объектов, содержащих упорядоченные и не упорядоченные структуры. В данной работе дифрактометр используется для изучения дифракции Фраунгофера и осуществления пространственной фильтрации изображения.

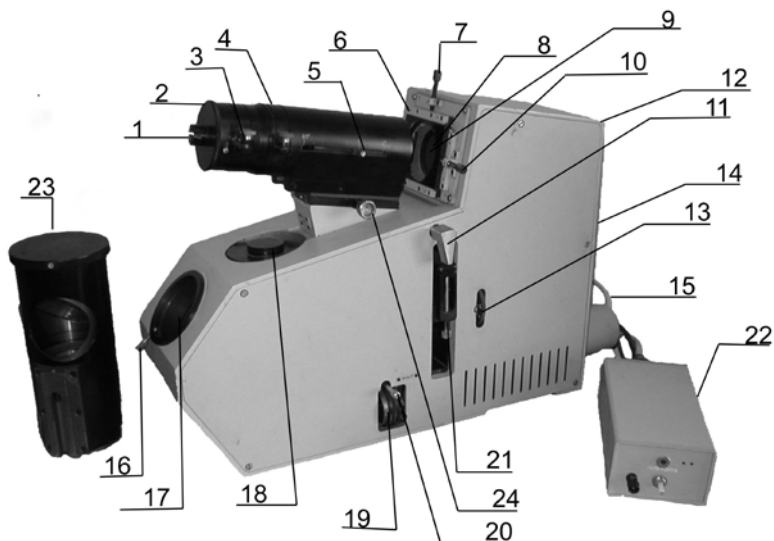


Рис. 12.7.

Дифрактометр (рис. 12.7) состоит из корпуса 14, дифракционного 2 и репродукционного 23 объективов, рамки с исследуемым объектом 21, столика масок 8 для помещения в него щели. Перемещения столика в горизонтальном и вертикальном направлениях осуществляется винтами 10 и 7. В качестве источника света используется газовый лазер 17 типа ЛГН-208А, питаемый от блока 22. Диафрагма 13 ограничивает размер используемого участка предмета.

В режиме фильтрации дифракционный объектив 2 заменяется репродукционным объективом 23, который вставляется на направляющие типа "ласточкин хвост" и крепится винтом 24. Изображение сетки наблюдается на матовом экране, закрепленном в отверстии 17 винтом 16. При этом крышка 18 должна быть удалена. Изображение сетки наблюдается с помощью лупы в оправе. В режиме дифракции дифракционная картина наблюдается с помощью окуляра 1, который фокусируется путем продольного перемещения. Увеличение дифракционного объектива при этом должно соответствовать положению винта 5 на  $1^x$ . Поворот щели в столике масок из горизонтального положения в вертикальное осуществляется вращением рычага 9. Изменение яркости изображения производится сменой поглощающего светофильтра 19, путем продольного перемещения рукоятки 20.

Принципиальная схема оптического дифрактометра приведена на рис. 12.8.

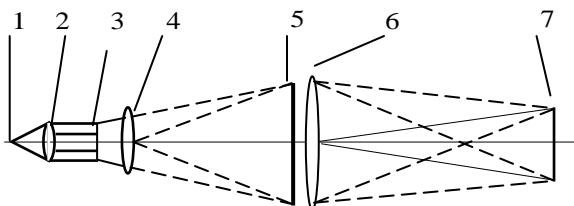


Рис. 12.8.

Световой поток из источника 1 проходит через коллиматор 2 и параллельным пучком освещает исследуемый снимок 3 (капроновую сетку).

В задней фокальной плоскости линзы 4 формируется дифракционное изображение сетки 5, представляющие собой его Фурье-спектр. Световые лучи, прошедшие сетку, рассеиваются и фокусируются на некотором расстоянии от оси. За плоскостью 5 установлена фильтрующая линза 6. Эта линза совместно с линзой 4 создает изображение исследуемой сетки 3 на экране 7.

Если в дифракционную картину 5 внести соответствующие изменения (например, закрыть отдельные максимумы), то можно вызвать соответствующие изменения в изображении сетки 7, т.е. провести фильтрацию изображения.

Оптическая схема дифрактометра показана на рис. 12.9.

Выходящий из квантового генератора 1 пучок проходит через объектив 2 телескопической системы, светофильтр 3, фотозатвор 4, зеркала 5, 6, 7 и попадает на второй объектив 8. Лазерный луч, расширенный телескопической системой, попадает на исследуемую сетку, помещенную в столик 9. Рассеянные сеткой лучи проходят через линзу 10, в фокальной плоскости 14, которой формируется дифракционная картина. Объектив 15 при помощи зеркал 16 и 17 создает изображение сетки на матовом экране 18.

При работе в режиме дифракции система линз 15 (репродукционный объектив) заменяется дифракционной насадкой, состоящей из объектива 19 с экраном 20 и лупой 21. Объектив 19 отображает дифракционную картину на матовый экран 20.

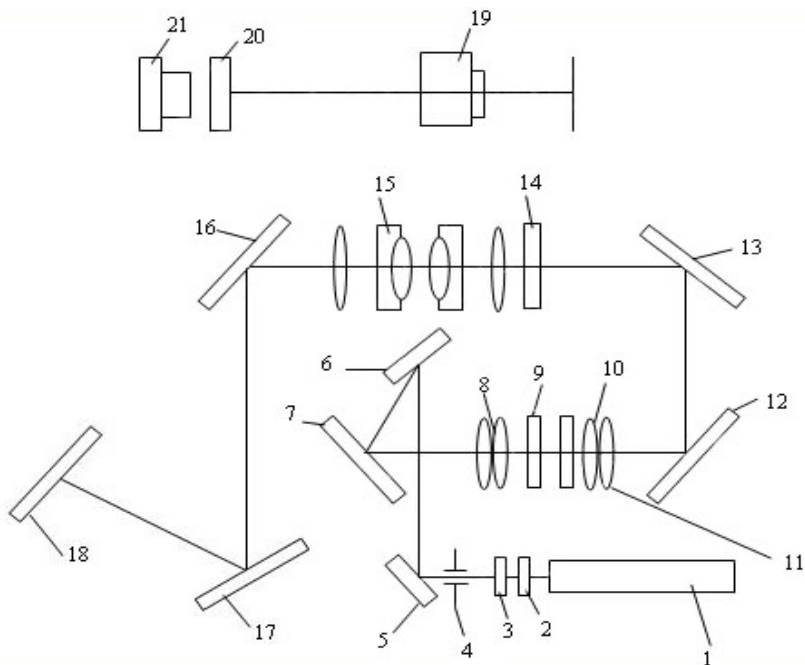


Рис. 12.9.

Экспериментальное определение периода двумерных структур осуществляют с помощью микроскопа МБИ-1. Для градуировки окуляра используют объективный микрометр. Объективный микрометр представляет собой стеклянную пластинку, помещенную в металлическую оправу, на которой делительной линейкой нанесены сто делений на длине 1 мм. Цена одного деления таким образом равна 0,01 мм.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

На диафрагме 13 (рис. 12.7) устанавливают раскрытие 54. В направляющие "ласточкин хвост" вставляют дифракционный объектив 2 и фиксируют его винтом 24. Винтом 25 устанавливают увеличение объектива в степени  $1^x$ . Включают шнур блока питания 22 лазера в сеть. Поворотом тумблера на блоке питания зажимают лазер. Перемещением рукоятки 20 от себя до упора вводят поглощающий

светофильтр. Передвигая лупу 1 в продольном направлении, фокусируют ее на шкалу.

## УПРАЖНЕНИЕ I

### Определение периода двумерных решеток

1. Помещают капроновую сетку в держатель рамки 21 и фиксируют в выбранном положении рукояткой 11.

2. На экране 2 наблюдают дифракционную картину в виде симметричных точек. Передвигая лупу 1 в продольном направлении, фокусируют ее на дифракционную картину и четкое видение шкалы.

3. Измеряют расстояние по оси  $X$  от центра максимума нулевого порядка до центра максимума первого порядка в левую сторону  $X'_{\text{ЛЕВ}}$ , затем в правую сторону  $X'_{\text{ПР}}$  и находят  $X' = \frac{X'_{\text{ЛЕВ}} + X'_{\text{ПР}}}{2}$ .

4. Из формулы  $d_x \sin \varphi = m\lambda$  определяют период  $d_x$ , где  $m$  – порядок максимума,  $\varphi$  – угол дифракции,

$$\sin \varphi = \frac{X'}{\sqrt{F^2 - (X')^2}}$$

$F$  – фокусное расстояние дифракционного объектива.

Так как  $X' \ll F$ , то в нашем случае  $\sin \varphi \approx \tan \varphi = \frac{X'}{F}$ . Тогда  $d'_x = \frac{m\lambda F}{X}$ , где  $F=400$  мм

5. Измеряют расстояние  $X''$  от центра максимума нулевого порядка до центра максимума второго порядка и  $X'''$  до центра максимума третьего порядка и вычисляют  $d''_x$  и  $d'''_x$ . Находят среднее значение  $d_x$ .

При этом следует помнить, что для максимума второго порядка  $m=2$ , третьего порядка  $m=3$ . Цена одного деления шкалы  $=0.1$  мм.

6. Аналогично проводят измерения вдоль оси  $Y$  и вычисляют  $d_y$ .

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение периода двумерных структур по логарифмическому графику

1. Как и в первом упражнении, на экране 2 наблюдают дифракционную картину в виде симметричных точек.



- Измеряют расстояние  $X'$  от центра максимума нулевого порядка до центра максимума первого порядка по оси  $X$  и  $Y'$  по оси  $Y$ .
- Используя логарифмический график для соответствующего увеличения  $1^x$  (рис. 12.10) по оси  $d$  находят периоды двумерных структур, при этом  $R = X'$  и  $R = Y'$ .

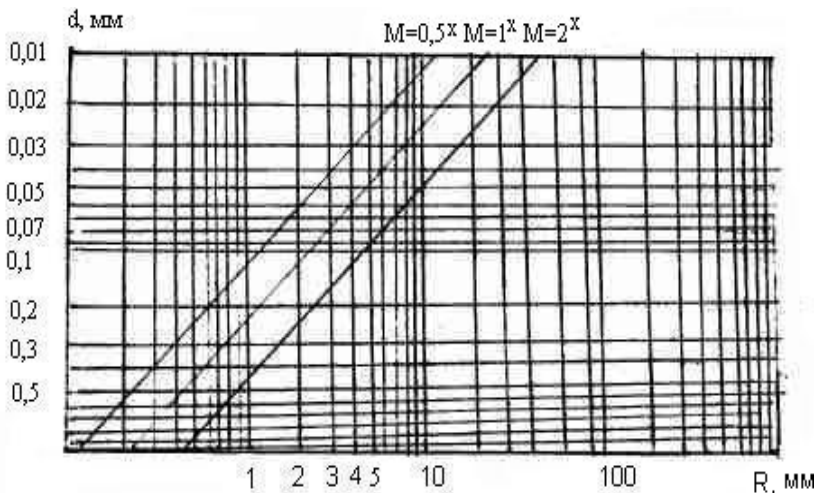


Рис.12.10.

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Экспериментальное определение периода двумерных структур

1. Определяют цену деления окулярного микрометра. Для этого на предметный столик микроскопа кладут объективный микрометр. Совмещают  $n$  делений окулярного микрометра с  $N$  делениями объективного микрометра. Цена деления окулярного микрометра равна  $K = \frac{N}{n} \cdot 0,01$  мм.

2. На предметный столик микроскопа кладут капроновую сетку, период которой нужно определить. Фокусируют микроскоп на сетку и измеряют вдоль оси  $X$  период решетки (сумму прозрачного и непрозрачного участков) в делениях микроскопа. Учитывая цену делений окулярного микрометра, находят  $d_x$ .

3. Поворачивают шкалу делений окулярного микрометра на 90 градусов и аналогично определяют  $d_y$ .

4. Сопоставляют периоды решетки  $d_x$  и  $d_y$  с периодами, определенными в упражнении I и II.

#### **УПРАЖНЕНИЕ IV**

##### **Осуществление пространственной фильтрации изображения**

1. Заменяют дифракционный объектив репродукционным. Для этого ослабляют винт 24 (рис. 12.7), снимают с направляющих дифракционный объектив и на его место вставляют репродукционный.

2. Вынимают с дифракционного объектива окуляр и вставляют его в оправу лупы.

3. Открывают крышку 18 и на матовом экране 17 с помощью лупы в оправе находят изображение сетки. Путем продольного перемещения лупы фокусируют ее на четкое видение сетки и шкалы.

4. Столик масок 8 (рис. 12.7) в круглой оправе помещают в щель, поворотом рычага 9 размещают щель горизонтально. Щель помещена в фокальной плоскости линзы, где образовывается дифракционная картина.

5. Перемещением винта 7 выводят излучение лазера на середину щели.

6. На матовом экране 17, с помощью лупы в оправе, наблюдают изображение сетки в виде вертикальных полос. Горизонтальные полосы отсутствуют. Произошла фильтрация изображения.

7. Рычагом 9 поворачивают щель и размещают ее вертикально. Перемещением винта 10 выводят излучение лазера на середину щели.

8. На матовом экране 17 с помощью лупы вновь наблюдают изображение сетки в виде горизонтальных полос.

9. Делают выводы.

#### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Чем дифракция Фраунгофера отличается от дифракции Френеля?
2. Каковы основные характеристики дифракционной решетки?
3. Чем одномерная решетка отличается от двумерной?
4. Что такое период дифракционной решетки?
5. При каких условиях наблюдается дифракция света?
6. Каково назначение дифрактометра ИФ-124?
7. В чем сущность пространственной фильтрации изображения?
8. Какие способы определения периода двумерных структур используются в работе?
9. Сформулируйте теорему Фурье.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИФРАКЦИОННОГО СТИЛОСКОПА СЛ-13

Цель работы: научить студентов определять дисперсию и разрешающую способность дифракционного стилоскопа.

Приборы и принадлежности: дифракционный стилоскоп СЛ-13, исследуемые образцы, атласы спектральных линий.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В стилооскопе СЛ-13 в качестве диспергирующего элемента используется вогнутая дифракционная решетка, которая одновременно является и фокусирующим устройством. Условие образования главных максимумов для вогнутой решетки такое же, как и для плоской, т.е.

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (13.1)$$

где  $d$  – период решетки;  $m$  – порядок спектра;  $\lambda$  – длина световой волны.

Основными характеристиками вогнутой дифракционной решетки являются: разрешающая способность, угловая и линейная дисперсия.

Обычно положение спектральной линии в аппарате задается углом, определяемым направлением нормали к волновому фронту после дисперсионного элемента. Поэтому дисперсию определяют как угловое расстояние между направлениями для двух спектральных линий, отличающихся по длине волны на  $1 \text{ \AA}$ . Если двум линиям, отличающимся по длине волны на  $d\lambda$ , соответствует разница в углах, равная  $d\varphi$ , то мерой дисперсии служит величина

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda},$$

называемая угловой дисперсией и выражаемая, например, в угловых единицах на ангстрем.

Дифференцируя соотношение (13.1), получаем:

$$d \cos \varphi d\varphi = m d\lambda,$$

т.е

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}. \quad (13.2)$$

Таким образом, дисперсия тем больше, чем меньше период решетки  $d$  и чем выше порядок  $m$  наблюдаемого спектра.

Так как мы часто наблюдаем положение линии на экране или фотопластинке, то удобно заменить угловое расстояние между линиями линейным расстоянием  $dl$ , выраженным, например, в миллиметрах. Линейная дисперсия вогнутой решетки равна

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} = \rho \frac{d\varphi}{d\lambda} . \quad (13.3)$$

где  $\rho$  – радиус кривизны решетки ( $\rho=250$  мм).

Вращая барабан, мы поворачиваем на определенный угол дифракционную решетку. Поворот решетки приводит к перемещению спектра. Если барабан повернуть на  $N$  делений, то решетка повернется на угол  $\alpha$ . Тогда дифрагированный луч отклонится от первоначального положения на угол  $2\alpha$ . Общее отклонение дифрагированного луча от первоначального положения нормали составит  $\varphi+2\alpha$ . Таким образом, поворот барабана на  $\Delta N$  делений пропорционален изменению угла дифракции на  $\Delta\varphi$ , а величина  $\frac{\Delta N}{\Delta\lambda}$  пропорциональна угловой дисперсии  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}$ .

Проведем оценку соотношений  $\Delta N$  и  $\Delta\varphi$ . Сканирование спектра осуществляется поворотом дифракционной решетки. При повороте барабана от деления 400 до 730 дифракционная решетка повернется на угол от  $13^\circ 33'$  до  $24^\circ 52'$ , а дифрагированный луч отклонится на угол, в два раза больший. Тогда

$$\beta = \frac{2(24^\circ 52' - 13^\circ 33')}{720 - 400} = 4,2 \frac{\text{угл.мин}}{\text{дел}} . \quad (13.4)$$

Угловая дисперсия равна

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = \beta \frac{\Delta N}{\Delta\lambda} . \quad (13.5)$$

Линейную дисперсию найдем как

$$D_l = \rho \cdot \beta \frac{\Delta N}{\Delta\lambda} . \quad (13.6)$$

Большая дисперсия еще не означает, что две спектральные линии с близкими длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda+d\lambda$  разрешаются спектральным аппаратом, т.е. при их наблюдении воспринимаются как отдельные спектральные линии. Наименьшая разность длин волн двух спектральных линий  $d\lambda$ , при которой спектральный аппарат разрешает эти линии, называется спектральным разрешаемым расстоянием, а величина

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda}, \quad (13.7)$$

называется разрешающей способностью аппарата. Здесь  $\lambda$  – длина волны, около которой выполняется измерение,  $d\lambda$  – разность длин волн между двумя близко расположенными линиями.

Разрешающая способность решетки зависит от числа штрихов решетки  $N$ , порядка спектра  $m$  и равна

$$R = mN. \quad (13.8)$$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе проводятся исследования на стилоскопе СЛ-13. Стилоскоп предназначен для визуального качественного и полуколичественного спектрального анализа сталей, цветных металлов и сплавов в видимой области спектра. Оптическая схема прибора приведена на рис. 13.1.

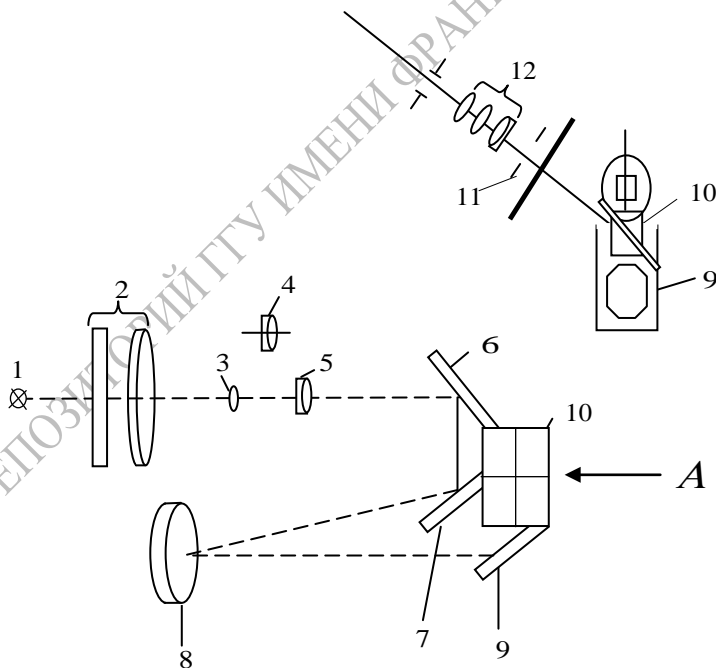


Рис. 13.1.

Свет от дугового или искрового разряда I с помощью трехлинзовой системы 2, 3, 5 и зеркал 6, 7 проецируется на вогнутую дифракционную решетку 8, равномерно ее освещая. При замене линзы 3 на линзу 4 источник проецируется вблизи щели, создавая её интенсивное освещение, что обеспечивает оптимальные условия при анализе трудновозбудимых элементов.

Дифракционная решетка выполняет роль фокусирующего и диспергирующего элемента. Криволинейные штрихи решетки устраняют aberrации.

Генератор к стилоскопу построен по принципу двойного питания. Он представляет собой низковольтный контур с управляемой фазой зажигания дуги переменного тока и низковольтной искры с помощью высоковольтных импульсов малой энергии.

Внешний вид прибора приведен на рис. 13.2.

Он состоит из оптической головки 1, генератора 3 и приставки 6. Оптическая головка включает в себе осветительную систему, щель, дифракционную решетку, систему поворотных зеркал, окулярную головку, размещенные внутри корпуса 1.

Дифракционная решетка закреплена в основании. Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки вокруг оси с помощью маховичка 5, соединенного с барабаном, на котором нанесена шкала. Рукояткой 4 перемещают фотометрический клин и выводят в поле зрения диафрагму, соответствующую окуляру с увеличением  $13,5^{\times}$ .

В левой части прибора внутри отсека 21 расположен кронштейн с держателем дискового электрода. Держатель электрода можно перемещать по высоте рукояткой 18, в направлении, перпендикулярном оптической оси – рукояткой 19 и вращать – рукояткой 20. Вращением маховичка 22 можно плавно менять величину зазора между электродами разрядника. Для стабильного горения дуги расстояние между образцом и диском устанавливают порядка 1-2 мм.

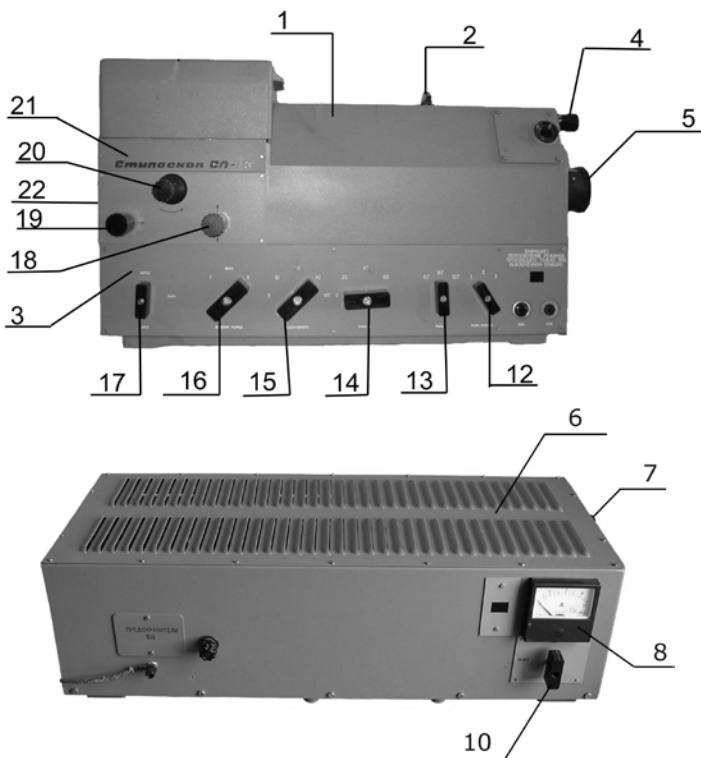


Рис. 13.2.

В качестве источника возбуждения спектра применяют генератор 3. Он представляет собой литой корпус, внутри которого размещен силовой трансформатор, импульсный трансформатор, катушка индуктивности, блок сопротивлений, блок конденсаторов, переключатели.

Все управление генератором вынесено на переднюю панель корпуса в виде переключателей 12-17.

Приставка б содержит в себе реостат, трансформатор, блок конденсаторов, магнитный пускатель, пакетный переключатель, амперметр. Приставка соединяется разъемом с генератором и в сеть включается при помощи соединительного шнура.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

На столик помещают анализируемый образец, поверхность которого тщательно очищена, и устанавливают расстояние между

электродом и образцом 1-2 мм. Исследования выполняют в режиме дуги. Для получения режима дуги переключатель 13 устанавливают в положение  $60^\circ$ , переключатель 12 – в положение 1, переключатель 14 – в положение «0»; переключатель 16 – положение II; переключатель 17 – в положение "ВЫКЛ"; переключатель 15 – в положение «0»

Сетевой шнур приставки включают в розетку. Переключатель 10 приставки переводят в положение 10А. Нажатием кнопки 23 зажигают электрическую дугу между электродами. Поворотом маховичка 7 устанавливают на амперметре ток 8А. Поворотом маховичка 22 на небольшой угол добиваются стабильного горения дуги.

## УПРАЖНЕНИЕ I

### Построение градуировочной кривой

1. В поле зрения окуляра 24 вращением барабана 5 выводят фиолетовый участок спектра с характерными линиями.
2. С помощью атласа спектральных линий отыскивают их длину волны и по шкале барабана снимают отсчет  $N$ .
3. Вращением барабана 5 в поле зрения выводят последовательно синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный участки спектра. По атласу находят для них характерные линии и для каждой линии снимают отсчет по шкале барабана. Данные заносят в таблицу.
4. Строят график зависимости  $N=f(\lambda)$ , откладывая по оси абсцисс длину волны  $\lambda$ , а по оси ординат – отсчет  $N$ .

Цвет спектра	фиолетовый	синий	голубой	зеленый	желтый	оранжевый	красный
Длина волны $\lambda$							
Отсчет по шкале барабана $N$							

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение угловой дисперсии стилоскопа

1. Выбрать в фиолетовой области две линии  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .



- По графику определить для них значения  $N_1$  и  $N_2$ .
- Вычислить для этой области величину  $\frac{\Delta N}{\Delta \lambda} = \frac{N_2 - N_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ .
- Используя формулу (13.5), вычислить угловую дисперсию  $\frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}$ .  
При этом угловые минуты величины  $\beta$  необходимо перевести в радианы ( $1' = 2,91 \cdot 10^{-4}$  рад).
- Аналогичные измерения сделать для голубой, зеленой и красной области спектра и определить для них угловую дисперсию  $\frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}$ .
- Сделать вывод.

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Определение линейной дисперсии стилоскопа

- Используя формулу (13.6) и значения угловой дисперсии, вычисленные в предыдущем упражнении, определить линейную дисперсию для фиолетовой, голубой, зеленой и красной областей спектра.
- Вычислить среднее значение  $\bar{D}_l = \frac{\Delta l}{\Delta \lambda}$ .
- Определить величину обратной дисперсии  $D_{обр} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta l}$  и сопоставить ее с обратной линейной дисперсией прибора  $D_{пр} = 3,2^{мм}/_{мм}$ .
- Вычислить относительную погрешность по формуле

$$Z = \frac{D_{пр} - D_{обр}}{D_{пр}} \cdot 100\% .$$

### УПРАЖНЕНИЕ IV

#### Определение разрешающей способности стилоскопа

- Для фиолетовой, голубой, зеленой и красной областей спектра выбрать по атласу по две пары спектральных близко расположенных (различие 1-2 нм) линий.
- Вычислить для каждой пары линий по формуле (13.7) разрешающую способность, где

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}; \quad \Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 .$$

3. Провести вычисления разрешающей способности решетки по формуле (13.8). Решетка работает в первом порядке спектра. Общее число работающих штрихов для нее равно 3600.
4. Сопоставить вычисленные значения  $R$  и сделать выводы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается дифракционный спектр от призматического?
2. Какие основные характеристики дифракционного спектографа?
3. Как определяется угловая дисперсия в работе?
4. Как определяется величина обратной дисперсии?
5. Как определяется разрешающая способность прибора?

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТИЛОСКОПА СЛ-ПА

Цель работы: исследовать спектр дуги железа, определить дисперсию и разрешающую способность стилоскопа.

Приборы и принадлежности: стилоскоп СЛ-ПА, набор исследуемых образцов, атлас дуговых спектральных линий.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Основное назначение спектральных аппаратов состоит в установлении длины волны исследуемого света — задача, которая в большинстве случаев сводится к измерению различия в длинах волн двух близких спектральных линий. Коэффициент преломления любого материала в той или иной степени зависит от длины волны света. Это свойство, называемое дисперсией, может быть использовано для того, чтобы разложить свет на спектральные составляющие. Одним из устройств, используемых для этих целей, является стеклянная призма.

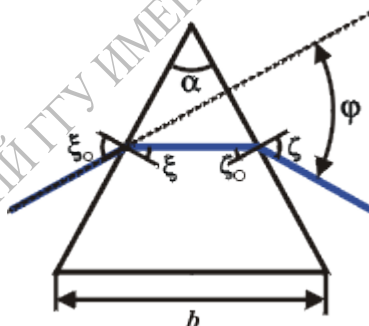


Рис.14.1

Рассмотрим луч света, распространяющийся симметрично через стеклянную призму (см. рис.14.1). Если  $\alpha$  - преломляющий угол призмы, то из формулы  $n = \sin \xi_0 / \sin \xi = \sin \zeta / \sin \zeta_0$  мы можем найти, что

$$n = \sin (\alpha / 2 + \varphi / 2) / \sin (\alpha / 2) \quad (14.1)$$

На практике коэффициент преломления материала призмы  $n$  зависит от длины волны света  $\lambda$ , так что угол  $\varphi$ , под которым призма преломляет свет, будет также зависеть от длины волны:

$$D = d\varphi / d\lambda = (d\varphi / dn)(dn / d\lambda) \quad (14.2)$$

Величина  $dn/d\lambda$  называется дисперсией материала. Эта величина и коэффициент преломления  $n(\lambda)$  характеризуют основные оптические свойства материала, из которого изготовлена призма.

Дифференцируя формулу (14.1), мы можем найти первый сомножитель в правой части соотношения (14.2):

$$dn / d\varphi = \cos(\alpha/2 + \varphi/2) / 2\sin(\alpha/2) \quad (14.3)$$

и поэтому, если двум линиям, отличающимся по длине волны на  $d\lambda$ , соответствует разница в углах, равная  $d\varphi$ , то угловая дисперсия призмы определяется выражением

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (14.4)$$

Вращая маховичок барабана, мы поворачиваем призму и изменяем угол  $\varphi$ , показания шкалы барабана  $N$  пропорциональны углу поворота призмы  $\varphi$ . Угловая дисперсия призмы  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}$

пропорциональна  $\frac{\Delta N}{\Delta\lambda}$ :

$$D_\varphi \sim \frac{\Delta N}{\Delta\lambda} \quad (14.5)$$

Угловая дисперсия зависит от величины преломляющего угла призмы, ее материала и длины волны, но не зависит от линейных размеров призмы. Линейная дисперсия определяется отношением  $\frac{\Delta x}{\Delta\lambda}$ , где  $\Delta x$  – расстояние на фотопластинке между двумя спектральными линиями, длины волн которых отличаются друг от друга на  $\Delta\lambda$ . Если фокусное расстояние объектива равно  $f$ , то имеет место соотношение

$$\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} = f \cdot \frac{\Delta N}{\Delta \lambda} \quad (14.6)$$

Одной из важнейших характеристик спектрального прибора является его разрешающая способность. Вследствие дифракции ограниченного светового пучка, выходящего из коллиматора, изображение щели не повторяет форму самой щели. Это изображение, состоящее из главных и побочных максимумов, представляет собой более сложное распределение интенсивностей. Когда главный максимум дифракционного изображения щели для света с длиной волны  $\lambda$  совпадает с первым минимумом такого же изображения щели для света с длиной волны  $\lambda + d\lambda$ , то это положение условно считается пределом разрешения спектральных линий  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ .

Наименьшая разность длин волн двух спектральных линий  $d\lambda$ , при которой спектральный аппарат разрешает эти линии, называется спектральным разрешаемым расстоянием.

Мерой разрешающей способности спектрального аппарата принято считать отношение длины волны  $\lambda$ , около которой выполняется измерение, к указанному минимальному интервалу  $d\lambda$

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} . \quad (14.7)$$

Используя теорию дифракции на прямоугольном отверстии, можно получить следующее выражение для разрешающей способности призмы:

$$R = \frac{T \cdot \frac{dn}{d\lambda}}{1 + \Phi_0 \cdot \frac{S}{\lambda}} , \quad (14.8)$$

где  $T$  – суммарная длина оснований всех призм,  $\Phi_0$  – светосила объектива коллиматора (отношение площади апертурной диафрагмы к квадрату фокусного расстояния объектива),  $S$  – ширина щели.

Если ширина щели  $S$  бесконечно мала, то

$$R = T \cdot \frac{dn}{d\lambda} , \quad (14.9)$$

где  $n$  – показатель преломления призмы.

Для призмы при постоянной длине волны падающего света разрешающая способность зависит только от длины основания призмы и не зависит от преломляющего угла.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная оптическая схема стилоскопа СЛ-ПА показана на рис. 14.2. Свет от дуги 1 с помощью трехлинзовой системы 2-4 равномерно заполняет щель 5. Отражающая призма 6 направляет пучок на объектив 7, в фокусе которого помещена щель. Полученный параллельный пучок падает на диспергирующие призмы 8 и 9. Большой катет призмы 9, имеющий преломляющий угол  $30^\circ$  посеребрен. Поэтому лучи отражаются от него и проходят в обратном направлении через призмы объектива. Затем лучи попадают на прямоугольную призму 10 и зеркало 11, которые направляют их в окуляр 12. В фокальной плоскости окуляра расположен фотометрический клин 13.

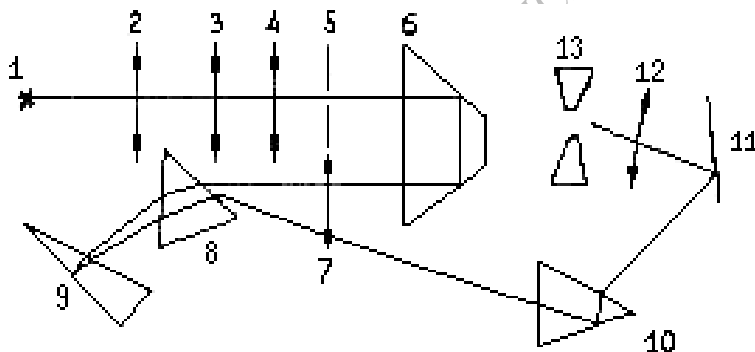


Рис. 14.2.

Внешний вид прибора приведен на рис. 14.3 (см. фотографию). Стилоскоп СЛ-ПА состоит из корпуса 1, внутри которого расположена электрическая схема прибора 4; съемной крышки 2, под которой расположена оптическая схема прибора; окуляра 3, маховичка 4, осуществляющего поворот призмной системы и смещение спектра в поле зрения; тумблеров 5 и 6 включения прибора в сеть и переключения режима тока (2А и 4А), рукоятки 7 переключения режима работы прибора. Исследуемый образец 8 размещают на столике 9 над дисковым электродом. Смещение дискового электрода в разных направлениях и его поворот вокруг своей оси осуществляется с помощью маховичков 10, 11, 12. Наверху съемной крышки 2 расположен маховичок 13, осуществляющий введение в оптическую

схему прибора фотометрического клина. К клемме 14 подключается заземление прибора. Отсчет показаний барабана производится по шкале 15. Держатель 16 служит для крепления образца.

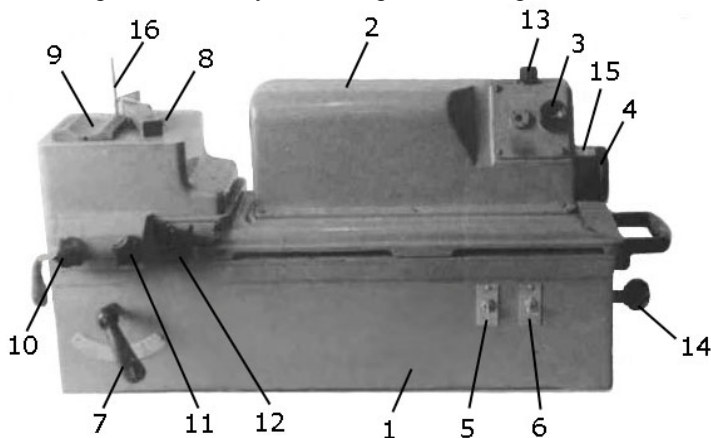


рис. 14.3.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Зачищенный образец 8 помещают над дисковым электродом на столик прибора 9. Держатель 16 прижимает его.
2. Маховичком 10 устанавливают между дисковым электродом и образцом зазор, равный 3мм. Проверяют заземление прибора.
3. Переключатель 7 устанавливают в положении “дуга”, переключатель 5 – в положении “вкл”. Зажигают дугу между образцом и электродом.
4. Наблюдая в окуляр 3, маховичком 4 выводят на середину поля зрения требуемую область спектра. Если в поле зрения спектральных линий не наблюдается, то перемещением маховичка 12 добиваются зажигания дуги и их появления. Вращением маховичка 11 регулируют яркость горения дуги.

## УПРАЖНЕНИЕ I

### Построение градуировочной кривой

1. Вращением маховичка 4 устанавливают указатель, видимый в поле зрения окуляра, на красную линию, найденную по атласу спектральных линий, и снимают отсчет  $N$  по шкале барабана. Записывают показания барабана и найденную длину волны.
2. Аналогичные измерения делают для других спектральных линий, найденных по другим карточкам атласа спектральных линий, и для них также снимают показания шкалы барабана. Записывают снятые показания  $N$  и  $\lambda$ . Выполняют 16 измерений (по одному на каждую карточку атласа спектральных линий).
3. Строят градуировочный график, откладывая по оси абсцисс длины волн  $\lambda$ , а по оси ординат – значения барабана  $N$ , т.е.  $N = f(\lambda)$ .

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение угловой дисперсии стилоскопа

1. По градуировочному графику для красной области спектра при изменении  $\Delta\lambda$  на  $100\text{Å}$  находят  $\Delta N$  и определяют угловую дисперсию, найдя отношение  $\frac{\Delta N}{\Delta\lambda}$ . Аналогичные измерения выполняют для зеленой и фиолетовой областей спектра.
2. Делают вывод.

## УПРАЖНЕНИЕ III

### Определение линейной дисперсии прибора

1. Используя  $\frac{\Delta N}{\Delta\lambda}$ , найденные в упражнении II по формуле (14.6) вычисляют линейную дисперсию для красной, зеленой и фиолетовой областей спектра. Фокусное расстояние окуляра  $f = 275$  мм.
2. Делают вывод.



### УПРАЖНЕНИЕ IV

#### Определение разрешающей способности стилоскопа

- Для красной области спектра по атласу спектральных линий выбирают три пары близко расположенных спектральных линий (1-2 мм между ними) и определяют для них

$$\Delta\lambda'_{кр} = \lambda'_1 - \lambda'_2; \quad \Delta\lambda''_{кр} = \lambda''_1 - \lambda''_2;$$

$$\Delta\lambda'''_{кр} = \lambda'''_1 - \lambda'''_2.$$

Для этих пар вычисляют среднее значение длины волны

$$\lambda' = \frac{\lambda'_1 + \lambda'_2}{2}; \quad \lambda'' = \frac{\lambda''_1 + \lambda''_2}{2};$$

$$\lambda''' = \frac{\lambda'''_1 + \lambda'''_2}{2}.$$

- Для каждой пары вычисляют разрешающую способность по формулам

$$R'_{кр} = \frac{\lambda'}{\Delta\lambda'}; \quad R''_{кр} = \frac{\lambda''}{\Delta\lambda''}; \quad R'''_{кр} = \frac{\lambda'''}{\Delta\lambda'''}$$

Находят среднее значение:  $\bar{R}_{кр} = \frac{R'_{кр} + R''_{кр} + R'''_{кр}}{3}$ .

- Аналогичные измерения выполняют для зеленой и фиолетовой областей спектра и находят  $\bar{R}_z$  и  $\bar{R}_\phi$ .
- Делают вывод.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какова принципиальная оптическая схема стилоскопа?
- Чем отличается призматический спектр от дифракционного?
- Каковы основные характеристики призматических спектральных приборов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ

Цель работы: исследовать зависимость показателя преломления стеклянной призмы от частоты света.

Приборы и принадлежности: ртутная лампа, универсальный монохроматор УМ-2, гониометр ГС-5, плоскопараллельная стеклянная пластинка, стеклянная призма.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

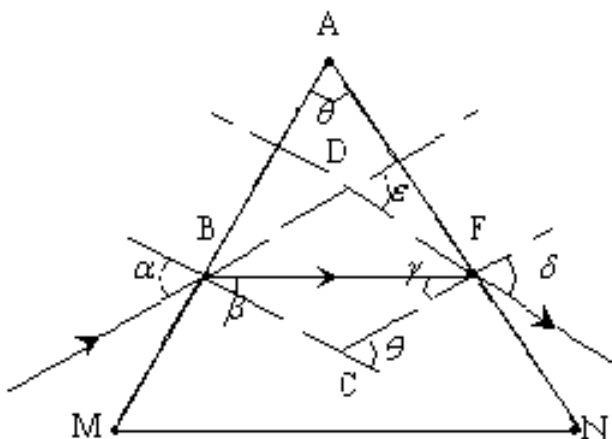


Рис 15.1.

Показатель преломления может быть определён путём измерения угла наименьшего отклонения луча при прохождении света через призму. Для пояснения используемого в работе метода рассмотрим стеклянную призму  $AMN$  с преломляющим углом  $\theta$ , на грань  $AM$  которой падает луч света (рис. 15.1). Углы падения  $\alpha$  и преломления  $\beta$  характеризуют прохождение света через грань  $AM$ , а соответствующие углы  $\gamma$  и  $\delta$  – через грань  $AN$ . Продолжения падающего на призму и выходящего из неё лучей пересекаются в точке  $D$ , а перпендикуляры  $BC$  и  $CF$  к граням призмы  $AM$  и  $AN$  в точке  $C$ . Отклонение света от первоначального направления распространения характеризуется углом  $\epsilon$  между выходящим и падающим лучами. Рассматривая треугольник  $BCF$  и четырёхугольник  $BCFD$ , получаем

$$\beta + \gamma = \theta \quad (15.1)$$

$$\alpha + \delta = \varepsilon + \theta \quad (15.2)$$

Угол отклонения  $\varepsilon$  экстремален, если выполняется условие  $d\varepsilon/d\alpha = 0$ , которое с учётом (15.2) может быть записано в виде

$$\frac{d}{d\alpha}(\alpha + \delta) = 0 \quad (15.3)$$

Используя законы преломления света на гранях AM и AN

$$\sin \alpha = n \sin \beta, \quad \sin \delta = n \sin \gamma, \quad (15.4)$$

преобразуем соотношение (15.3) следующим образом:

$$\frac{d}{d\alpha} [\arcsin(n \sin \beta) + \arcsin(n \sin \gamma)] = 0 \quad (15.5)$$

Выполняя дифференцирование в (15.5) и учитывая условие, вытекающее из (15.1), получаем:

$$\frac{1 - \sin^2 \beta}{1 - n^2 \sin^2 \beta} = \frac{1 - \sin^2 \gamma}{1 - n^2 \sin^2 \gamma} \quad (15.6)$$

Это уравнение выполняется только в том случае, если  $\beta = \gamma$ . Тогда на основании (15.4) имеем

$$\alpha = \delta \quad (15.7)$$

Аналогично можно вычислить и вторую производную  $\varepsilon$  по  $\alpha$  и показать, что при выполнении условия (15.7),  $d^2\varepsilon/d\alpha^2 > 0$ , то есть отклонение минимально.

Таким образом, в соответствии с уравнением (15.7) минимальное отклонение света от первоначального направления распространения имеет место при симметричном прохождении луча через призму, когда свет на участке BF распространяется параллельно основанию призмы MN.

Учитывая (15.1), (15.2) и (15.7), можно записать:

$$\alpha = \frac{1}{2}(\varepsilon_{\min} + \theta); \quad \beta = \frac{1}{2}\theta.$$

Следовательно,

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \frac{\varepsilon_{\min} + \theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (15.8)$$

Таким образом, зная преломляющий угол  $\theta$  и измерив экспериментально угол наименьшего отклонения  $\varepsilon_{min}$  для света определённой частоты, можно по формуле (15.8) вычислить показатель преломления стекла  $n$ .

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для определения показателя преломления призмы включает в себя ртутную лампу с источником питания, монохроматор УМ-2 и гониометр ГС-5. Ртутная лампа даёт спектр, состоящий из семи линий, лежащих в фиолетовой, синей, зелёной, жёлтой и красной областях спектра. Монохроматор УМ-2 выделяет узкие участки спектра в видимой и инфракрасной областях спектра и направляет их на гониометр ГС-5. Выделение спектральных линий происходит путём поворота системы призм, расположенных внутри корпуса монохроматора. Поворот осуществляется путём вращения барабана, расположенного на передней стенке прибора.

Гониометр ГС-5 (рис. 15.2) состоит из следующих основных частей: основания 1, коллиматора 2, корпуса 3, оптической трубы 4 с отсчетным микроскопом 5, столика 6. На основании прибора укреплены колонка коллиматора и вертикальная ось, вокруг которой могут вращаться лимб, корпус и столик. Коллиматор на конце содержит щель, ширину которой можно изменять с помощью микрометрического винта 18. Назначение коллиматора – создание параллельного пучка света. В вертикальной плоскости наклон коллиматора можно изменять, вращая винт 7.

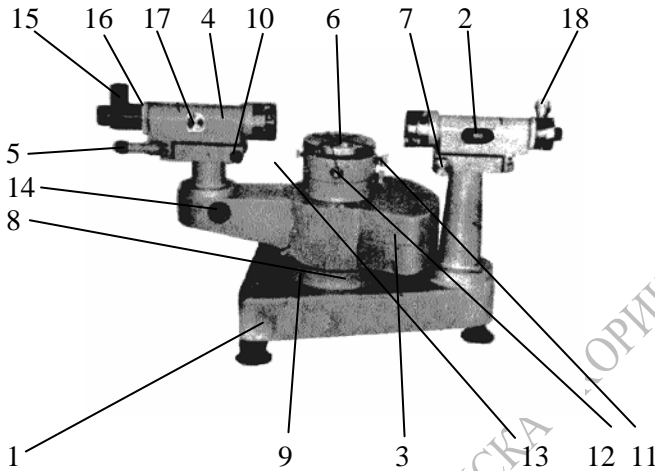


Рис. 15.2.

Корпус 3 может вращаться вместе с оптической трубой относительно основания. Плавное перемещение корпуса осуществляется микрометрическим винтом 8. Фиксирование корпуса производится зажимным винтом 9. Смещение оптической трубы в вертикальной плоскости осуществляется винтом 10.

В нижней части прибора на вертикальной оси расположен лимб с делениями. Изображение лимба через систему призм и объектив передается в оптический микроскоп. В поле зрения отсчетного микроскопа видна двойная шкала. Левая шкала оцифрована от 0 до  $360^{\circ}$ .

С правой стороны в поле зрения окуляра видна вторая шкала, которая позволяет отсчитывать целые минуты и секунды. Совмещение верхних и нижних штрихов лимба по левой шкале производится маховичком 14. Для снятия отсчета совмещают верхнюю и нижнюю шкалы.

Число градусов будет равно видимой ближней левой от вертикального индекса цифре. Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на  $180^{\circ}$ . Число единиц минут отсчитывается по шкале микроскопа в правом окне по левому ряду чисел. Число десятков секунд – в том же окне по правому ряду чисел. Число единиц секунд равно числу делений между штрихами,

соответствующими отсчету десятков секунд и неподвижным горизонтальным индексом.

Лимб может закрепляться неподвижно и перемещаться вместе со столиком с помощью микрометрического винта 11.

Подъем или опускание столика 6 осуществляется винтом 12, наклон – винтом 13.

Подсветка лимба гониометра и сетки окуляра производится лампой 15, соединенной со зрительной трубой кольцом 16. Фокусировка зрительной трубы на резкость осуществляется маховичком 17. Точно таким маховичком, расположенным с обратной стороны коллиматора 2, осуществляется его фокусировка. Оптическая труба снабжена автоколлимационным окуляром с крестом, подсветка которого осуществляется лампой 15.

При подготовке приборов к проведению измерений должны быть выполнены следующие операции:

1. Установка выходной щели монохроматора и коллиматора гониометра на одной оси.

2. Установка минимально возможных ширины выходной щели монохроматора и входной щели коллиматора гониометра.

3. Фокусировка трубы гониометра на бесконечность.

4. Ориентация оси трубы перпендикулярно оси вращения прибора.

5. Фокусировка коллиматора на резкое изображение щели.

6. Установка оси коллиматора перпендикулярно оси вращения столика.

7. Ориентация преломляющего ребра призмы параллельно оси вращения столика.

8. Установка коллиматора и зрительной трубы гониометра вдоль одной оси.

При выполнении указанных операций следует руководствоваться инструкцией по эксплуатации гониометра.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Определение преломляющего угла стеклянной призмы

**Способ 1.** Осветить крест окуляра и закрепить трубу неподвижно. Поворачивать столик с призмой до тех пор, пока изображение креста, одной из граней призмы, не совпадёт в поле зрения окуляра с самим крестом. В этом положении столик закрепить и произвести первый

отсчёт по лимбу. Затем, вращая столик, повернуть призму другой гранью к трубе, совместить кресты и произвести второй отсчёт по лимбу. Если при вращении столика отсчёт по лимбу монотонно убывал, то преломляющий угол призмы можно определить по формуле:

$$\theta = 180^{\circ} - (a - b), \quad (15.9)$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно первый и второй отсчёты по лимбу (см. рис. 15.3.а, на котором предположено, что столик Т с призмой неподвижен, а труба F вращается вокруг него).

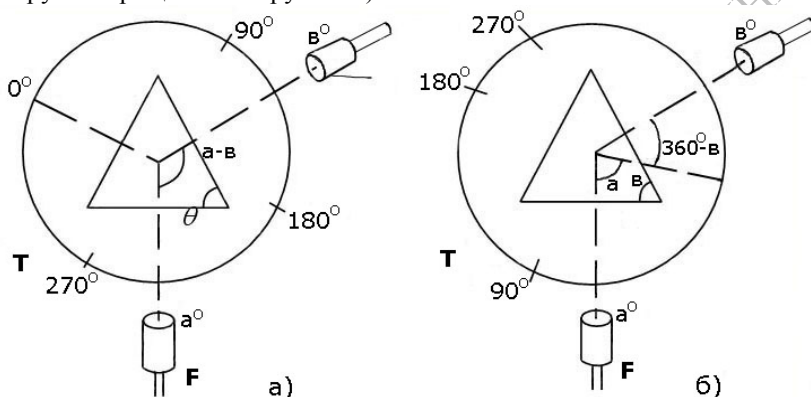


Рис. 15.3.

Если же при вращении столика отсчёт по лимбу перешёл через нуль, то (см. рис. 15.3.б):

$$\theta = 180^{\circ} - [a + (360^{\circ} - b)], \quad (15.10)$$

**Способ 2.** Осветить щель коллиматора и поворачивать столик с призмой таким образом, чтобы выходящий из коллиматора пучок света образовал с гранью призмы угол, приблизительно равный  $45^{\circ}$ . Закрепив столик, вращать оптическую трубу к основанию призмы до тех пор, пока в поле зрения трубы не появится изображение щели коллиматора, отражённое от грани призмы. Совместить это изображение с крестом и, закрепив трубу, произвести первый отсчёт. Передвинув призму второй гранью к коллиматору, аналогично произвести второй отсчёт по лимбу. Вычислить преломляющий угол по формуле (15.9) или (15.10).

Измерив каждым способом преломляющий угол призмы 3-5 раз, взять из всех полученных результатов среднее арифметическое.

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение показателя преломления, дисперсии и разрешающей способности стеклянной призмы

1. Поместить ртутную лампу перед щелью коллиматора, зажечь её и повернуть столик так, чтобы биссектриса преломляющего угла призмы образовала с осью коллиматора острый угол, близкий к прямому. Пусть при этом основание призмы лежит вправо от наблюдателя.

2. Закрепив столик, вращать трубу вправо (к основанию призмы) до тех пор, пока зелёная линия ртути ( $\lambda=5450 \text{ \AA}$ ) не появится в поле зрения трубы. Установив на неё крест, закрепить трубу, затем, освободив столик, поворачивать его вместе с призмой в ту или другую сторону и наблюдать, куда движется линия, то есть увеличивается или уменьшается отклонение. Столик с призмой следует вращать так, чтобы спектральная линия приближалась к направлению не отклоненного светового пучка. После поворота столика на некоторый угол линия остановится, а затем начнёт вращаться назад; в этом положении призма установлена на угол наименьшего отклонения для зелёной линии ртути. Закрепить столик с призмой и, вращая трубу, совместить кресты с наблюдаемой линией.

3. Закрепив трубу, произвести отсчёт, затем снять призму со столика и повернуть трубу так, чтобы непосредственно видеть щель коллиматора, и вновь с помощью окуляра произвести отсчёт. Разность этих двух отсчётов и будет определять угол наименьшего отклонения для данной спектральной линии. Если высота призмы позволяет делать отсчёты не отклоненного светового пучка, не снимая призмы, то призму со столика можно не удалять.

4. Вновь установить призму на столик, повернуть столик с призмой в симметричное положение – основанием призмы влево, и повторить измерения.

Используя два полученных значения угла наименьшего отклонения, вычислить среднее значение  $\varepsilon_{min}$ .

5. По формуле (15.8) определить значение показателя преломления стекла для света данной длины волны. Затем измерить углы наименьшего отклонения для фиолетовой, красной и жёлтой линий спектра ртути и вычислить соответствующие значения показателей преломления  $n$ .

6. Используя таблицу I градуировки шкалы барабана монохроматора по длинам волн линий спектра ртути, построить график зависимости  $n - 1 = f(\lambda)$ . Из графика определить дисперсию



$D = dn/d\lambda$  материала, из которого сделана призма, для света различных длин волн. Зная  $D$ , вычислить разрешающую способность призмы  $R = l \cdot D$ , где  $l$  – длина основания призмы, параллельно которому идёт свет.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Ход световых лучей через призму. Угол наименьшего отклонения и его связь с показателем преломления и преломляющим углом призмы.
2. Дисперсия и разрешающая способность призмы.

Таблица 1. Зависимость числа деления барабана монохроматора от длины волны.

№ п/п	Отсчёт по шкале барабана	Длина волны линий ртутной лампы в выходной щели монохроматора, нм
1	2884	690,7
2	2502	585,2
3	2458	579,1
4	2447	576,9
5	2266	546,1
6	1838	491,6
7	1164	435,8

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: экспериментально проверить выполнимость закона Стефана-Больцмана и определить значения постоянных Стефана-Больцмана и Планка.

Приборы и принадлежности: оптический пирометр с исчезающей нитью; нихромовая проволока; амперметр; вольтметр; реостат; автотрансформатор.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Излучение и поглощение электромагнитных волн атомами вещества обусловлено колебаниями заряженных частиц около положений равновесия. При излучении теряется электромагнитная энергия. Поэтому излучение тел может происходить либо за счёт убыли энергии самого тела, либо за счёт энергии извне.

Если тело путём поглощения получает от окружающих тел такое количество энергии, которое компенсирует убыль его энергии на излучение, то говорят, что тело находится в равновесном состоянии, а излучение называется равновесным.

Излучение света происходит в результате переходов атомов, молекул и других атомных систем из состояний с большей в состоянии с меньшей энергией. Так называемое тепловое (температурное) излучение отличается от других видов излучения (люминесценции) только способом перехода излучающих систем в возбужденные состояния. В явлениях теплового излучения такой переход осуществляется в результате теплового движения атомов и молекул.

Для характеристики теплового излучения вводят ряд величин. Мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины называется спектральной плотностью энергетической светимости (излучательности) тела или излучательной способностью тела. Если обозначить мощность излучения в интервале частот  $\nu$  до  $\nu + \Delta\nu$  через  $dW_{\nu, \nu + \Delta\nu}$ , то спектральная плотность энергетической светимости тела может быть записана в виде:

$$E(\nu, T) = \frac{dW_{\nu, \nu+\Delta\nu}}{d\nu} . \quad (16.1)$$

Способность тела к поглощению падающего на него излучения характеризуется поглощательной способностью тела. Под поглощательной способностью тела понимают отношение количества поглощённой поверхностью энергии за единицу времени в интервале частот  $\nu, \nu+\Delta\nu$  к общему количеству падающего излучения в том же интервале частот:

$$A(\nu, T) = \frac{dW_{\nu, \nu+\Delta\nu}^{погл}}{dW_{\nu, \nu+\Delta\nu}^{пад}} . \quad (16.2)$$

Тела, полностью поглощающие все падающее на них излучение произвольной длины волны при любой температуре, называют абсолютно чёрными. Для них  $A(\nu, T) = 1$  для всех частот и температур. Реальные тела не являются абсолютно чёрными.

Для установления связи между излучательной и поглощательной способностями тела Прево в 1809 г. сформулировал правило: если два тела при одной и той же температуре поглощают разные количества энергии, то и излучение должно быть различным.

Количественная связь между излучательной и поглощательной способностями тела была установлена в 1859 г. Кирхгофом. Согласно закону Кирхгофа отношение излучательной и поглощательной способностей тела не зависит от природы тела и есть универсальная для всех тел функция частоты и абсолютной температуры

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = f(\nu, T) . \quad (16.3)$$

Обозначим для абсолютно чёрного тела лучеиспускательную способность  $\varepsilon(\nu, T)$ , а поглощательную –  $a(\nu, T)$ , тогда закон Кирхгофа запишется в виде:

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = \frac{\varepsilon(\nu, T)}{a(\nu, T)} = \varepsilon(\nu, T) . \quad (16.4)$$

Отсюда видно, что универсальная функция Кирхгофа есть ни что иное, как излучательная способность или спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела.

Чтобы определить, в какой области спектра излучает тело, необходимо знать вид функции  $\varepsilon(\nu, T)$ . Многочисленные попытки установить вид функции –  $\varepsilon(\nu, T)$  привели к открытию ряда частных законов излучения абсолютно чёрного тела.

Первый закон был установлен Стефаном и уточнён в 1884 г. Больцманом. Пользуясь термодинамическим методом, Больцман доказал, что интегральная излучательная способность абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры, т.е.

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon(\nu, T) d\nu = \sigma T^4, \quad (16.5)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана касается лишь интенсивности интегрального излучения чёрного тела и ничего не говорит относительно спектрального распределения энергии.

Второй закон, дающий указания на характер частотной зависимость функции  $\varepsilon(\nu, T)$ , хотя и не позволивший полностью определить ее, установлен Вином и имеет вид:

$$\varepsilon(\nu, T) = c\nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (16.6)$$

где  $c$  – скорость света в окружающей среде (в вакууме), а  $f$  – функция, для определения вида которой развитие Вином соображения оказались недостаточными.

Выражение (16.6) получило название обобщённого закона Вина. Важный результат, достигнутый Вином, состоит в том, что температура входит в выражение для спектральной плотности энергетической светимости лишь в виде отношения  $\nu/T$ . Тщательные измерения ряда исследователей привели к установлению эмпирического хода функции  $\varepsilon(\nu, T)$  и позволили проверить теоретические выводы Вина.

Метод исследования состоял в изучении распределения энергии по спектру излучения, посылаемого абсолютно черным телом при различных температурах. Кривые, полученные в результате этих исследований, приведены на рис.16.1

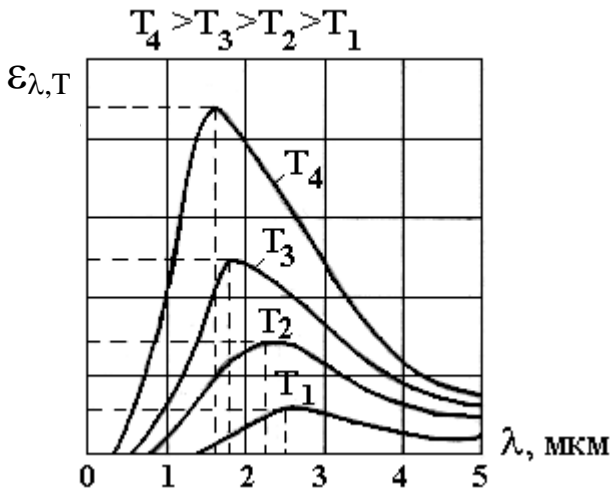


Рис. 16.1.

Положение максимума  $\lambda_{\max}$  удовлетворяет условию:

$$T\lambda_{\max} = b \quad , \quad (16.7)$$

где  $b$  – постоянная, не зависящая от температуры.

В форме записи (16.7) закон Вина носит название закона смещения. Он показывает, что положение максимума функции  $\varepsilon(\lambda, T)$  по мере возрастания температуры смещается в область коротких волн (рис. 16.1).

Несмотря на то, что законы Стефана-Больцмана и Вина играют в теории теплового излучения важную роль, они являются частными законами, так как не дают общей картины распределения энергии по частотам при различных температурах.

Следующая строгая попытка теоретического вывода зависимости  $\varepsilon(\nu, T)$  принадлежит английским ученым Д.Релею и Д. Джинсу.

В обобщенном виде соотношение получило название формулы Релея-Джинса:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \quad , \quad (16.8)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Однако в области больших частот кривая, полученная по формуле (16.8), сильно отличается от экспериментальной кривой, а интегральная излучательная способность стремится к бесконечности. Это несоответствие получило название "ультрафиолетовой катастрофы":

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu \rightarrow \infty. \quad (16.9)$$

Это означает, что равновесие между телом и его излучением установится только при температуре тела, равной абсолютному нулю.

Причина вышеуказанных трудностей связана с одним из основных положений классической физики, согласно которому энергия системы может изменяться непрерывно.

В 1900г., выдвинув новую теорию, согласно которой атомный осциллятор излучает свет дискретно, то есть отдельными порциями (квантами) с энергией  $\varepsilon = h\nu$ , Планку удалось установить вид функции  $\varepsilon(\nu, T)$ , хорошо согласующийся с экспериментом:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (16.10)$$

Выражение (16.10) получило название формулы Планка. Из нее следуют все законы теплового излучения абсолютно чёрного тела.

Проинтегрируем выражение (16.10) от 0 до  $\infty$  по  $\nu$ , обозначим через  $x = \frac{h\nu}{kT}$ , тогда  $dx = \frac{h}{kT} d\nu$ . Отсюда  $d\nu = \frac{kT}{h} dx$ .

С учётом обозначений получаем:

$$\varepsilon_T = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \sigma T^4,$$

где

$$\sigma = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3},$$

т.е. мы получили закон Стефана-Больцмана. Отсюда можно найти постоянную Планка:

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \sigma}}. \quad (16.11)$$

В области малых частот при условии  $h\nu \ll kT$ , разлагая  $e^{\frac{h\nu}{kT}}$  в ряд и ограничиваясь первым членом, получим:

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \approx \frac{h\nu}{kT}.$$

Тогда формула Планка (16.10) переходит в формулу Релея-Джинса:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{\frac{h\nu}{kT}} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT. \quad (16.12)$$

Также можно показать, что из формулы Планка следуют законы Вина.

Температура абсолютно чёрного тела может быть определена по характеру его излучения на основании одного из рассмотренных выше законов излучения. Методы определения температур, основанные на использовании этих законов, носят название оптической пирометрии. Приборы, используемые для этой цели, называются пирометрами излучения.

Измерив интегральную излучательную способность абсолютно чёрного тела  $\varepsilon_T$ , по известной величине  $\sigma$  на основании закона Стефана-Больцмана можно определить истинную термодинамическую температуру  $T$ . Как известно, нечёрные тела не подчиняются закону Стефана-Больцмана. Тем не менее, на практике при измерении интегральной излучательной способности  $E_T$  нечёрного тела пользуются этим законом. Определённая таким образом температура нечёрного тела называется радиационной.

Таким образом, радиационной температурой  $T_{rad}$  данного тела называют такую температуру чёрного тела, при которой суммарное излучение равно излучению исследуемого тела.

Соотношение радиационной температуры и истинной можно получить, используя закон Кирхгофа (16.4). Проинтегрировав

$E(\nu, T) = A(\nu, T) \varepsilon(\nu, T)$  от 0 до  $\infty$  по частоте  $\nu$

$$E_T = \int_0^{\infty} E(\nu, T) d\nu = \int_0^{\infty} A(\nu, T) \varepsilon(\nu, T) d\nu = a_T \varepsilon_T, \quad (16.13)$$

получаем, что

$$E_T = a_T \varepsilon_T, \quad (16.14)$$

где  $a_T$  – степень черноты тела при температуре  $T$ .

По закону Стефана-Больцмана с учётом формулы (16.14) получаем

$$\sigma T_{rad}^4 = a_T \sigma T^4$$

где  $T$  - истинная температура.

Преобразовав выражение, получаем:

$$T_{rad} = T \sqrt[4]{a_T}. \quad (16.15)$$

Так как  $a_T \leq 1$ , то  $T_{rad} \leq T$ .

Пирометры, позволяющие определять радиационную температуру, называют радиационными пирометрами.

Цветовая температура – параметр, характеризующий ход интенсивности  $I(\lambda)$  излучения какого-либо источника с изменением длины волны  $\lambda$  в оптическом диапазоне непрерывного спектра. Цветовую температуру принимают равной температуре абсолютно черного тела, имеющего в рассматриваемом интервале длин волн то же относительное распределение интенсивности, что и данный источник.

Для ее определения нужно знать длину волны, на которую приходится максимум лучеиспускательной способности. Если кривая распределения яркости по длинам волн для наблюдаемого тела не слишком отличается от планковской кривой, то цветовая температура  $T_{це}$  указывает ту температуру абсолютно чёрного тела, при которой его излучение наиболее близко по цвету к излучению наблюдаемого тела.

Под яркостной температурой понимают такую температуру абсолютно черного тела, при которой его излучательная способность для определенной длины волны  $\lambda_0$  равна излучательной способности рассматриваемого тела, т.е.

$$\varepsilon(\lambda_0, T_J) = E(\lambda_0, T), \quad (16.16)$$

где  $T$  - истинная температура тела.

Яркостную температуру можно определить с помощью пирометра с исчезающей нитью, в котором яркость нити пирометра уравнивается с яркостью исследуемого раскаленного тела.

От яркостной можно перейти расчетным путем к действительной температуре, если известно отношение монохроматических яркостей данного реального физического тела и абсолютно черного тела для выбранного цвета излучения и нужного интервала температуры, т. е. если известен коэффициент монохроматической излучательной способности.

Истинную температуру тела находят по специальным таблицам и коэффициентам для материала излучающих тел (см. табл 4,5).

Согласно закону Стефана-Больцмана



$$\varepsilon_T = \sigma T^4,$$

где  $\varepsilon_T$  – интегральная излучательная способность абсолютно черного тела,  $T$  – абсолютная температура по шкале Кельвина,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

С учетом теплового излучения окружающей среды, имеющей температуру  $T_0$ , количество лучистой энергии, излучаемой с поверхности  $S$  в единицу времени, равно:

$$Q = \varepsilon_T S = \sigma(T^4 - T_0^4)S, \quad (16.17)$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности.

Одним из способов поддержания излучения тела является пропускание электрического тока. При этом расходуемая мощность определяется напряжением  $U$  и силой тока  $I$

$$P = IU. \quad (16.18)$$

На основании закона сохранения энергии приравняем (16.17) и (16.18):

$$P = UI = \sigma S(T^4 - T_0^4). \quad (16.19)$$

Так как излучение нихромовой нити отличается от излучения абсолютно черного тела, то в выражении вводится поправка в виде коэффициента  $a$ , соответствующая так называемому "серому" телу. Из соотношения (16.19) находим постоянную Стефана-Больцмана, используя измеренную яркостную температуру:

$$\sigma = \frac{IU}{aS(T_{я}^4 - T_0^4)}, \quad (16.20)$$

где  $S = \pi dl$  – площадь поверхности нихромовой проволоки.

Пренебрегая для сильно нагретого тела температурой окружающей среды, можно определить зависимость расходуемой мощности от температуры тела следующим образом. По определению,  $\varepsilon_T$  – суммарная энергия, излучаемая с единичной площади в единицу

времени:  $\varepsilon_T = \frac{W}{St} = \frac{P}{S}$ .

Применим закон Стефана-Больцмана:  $\varepsilon_T = \sigma T_{я}^4$ .

Приравняв последние два выражения, имеем:

$$\frac{P}{S} = \sigma T_{я}^4.$$

Отсюда расходуемая мощность равна  $P = S\sigma T_{я}^4 = \sigma' T_{я}^4$ .

Прологарифмировав, получим следующее выражение:

$$\ln P = 4 \ln T_{я} + \ln \sigma' \quad (16.21)$$

где  $P = IU$  – потребляемая мощность;  $T_{я}$  – яркостная температура;  $\sigma' = \sigma S$ .

Из (16.21) следует, что зависимость логарифмов измеренных величин — линейная.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Оптический пирометр ОПИР-17 с исчезающей нитью (рис. 16.3) состоит из зрительной трубы 1, корпуса 2, шкалы 3, окуляра 4, реостата 5. В фокусе зрительной трубы находится эталонная лампочка накаливания.

Зрительная труба наводится на резкую видимость раскаленной проволоки так, чтобы нить лампочки своей верхней частью пересекла проволоку.

Лампа оптического пирометра питается от специального блока питания постоянного напряжения, э.д.с. которого - 2,4 В. Оптическая схема пирометра приведена на рис. 16.4.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПИРОМЕТРА

По мере возрастания температуры любого накаливаемого тела яркость его свечения увеличивается, а цвет изменяется.

Последнее означает, что с изменением температуры процентное соотношение лучей различных длин волн, испускаемых накаливаемым телом и определяющих цвет излучения, изменяется.

Если сравнить различные удельные мощности излучения всегда в одних и тех же монохроматических (т. е. одноцветных) лучах или (что то же самое) в лучах одной и той же длины волны, то эти мощности будут зависеть от температуры накаливаемых тел.

Зависимость между удельной мощностью излучения, длиной волны излучения (цветом излучения) и температурой излучателя определяется законом Планка.

Между тем закон Планка полностью справедлив только для так называемого абсолютно черного тела, представляющего собой воображаемый идеальный излучатель, развивающий наибольшую принципиально возможную при данной температуре мощность излучения.

Мощность излучения всех реальных физических тел по-разному отличается (в зависимости от разных длин волн) от мощности излучения абсолютно черного тела, оставаясь всегда меньше последней при прочих равных условиях.

Поскольку мощность излучения реального тела при какой-то температуре всегда меньше мощности излучения абсолютно черного тела при той же температуре, то, оценивая температуру по монохроматической яркости, нельзя определить действительную температуру реального физического тела. Вместо нее всегда определится относительно меньшая, так называемая яркостная температура, до которой надо нагреть абсолютно черное тело для того, чтобы его монохроматическая яркость была равна соответствующей фактической яркости реального физического тела.

От яркостной всегда можно перейти расчетным путем к действительной температуре, если только известно отношение монохроматических яркостей данного реального физического тела и абсолютно черного тела для выбранного цвета излучения и нужного интервала температуры, т. е. если известен коэффициент монохроматической излучательной способности (так называют указанное соотношение яркостей).

Итак, разбираемый оптический метод измерения температуры накаливаемых тел сводится к измерению их монохроматической яркости.

Так как измерение абсолютного значения яркости представляется затруднительным, то в оптическом пирометре помещают эталон яркости, для которого заранее способом сравнения с искусственным абсолютно черным телом установлена зависимость яркости от температуры. С яркостью эталона сравнивают яркость тела, температура которого измеряется. В оптическом пирометре с исчезающей нитью таким эталоном служит яркость нити специальной электрической лампы накаливания, именуемой пирометрической (или фотометрической) лампой.

Оптическая система пирометра позволяет рассматривать нить лампы на фоне изображения накаливаемого тела. Доводя яркость нити изменением тока накала до совпадения с яркостью накаливаемого тела, можно утверждать, что раз равны монохроматические яркости, то равны и температуры. А так как температура эталона всегда известна, то известна и измеряемая яркостная температура тела.

Момент достижения равенства монохроматических яркостей определяется на глаз с большой точностью, поскольку человеческий глаз является исключительно чувствительным нулевым индикатором контрастности излучения светящихся тел.

Достижение равенства яркостей, называемое фотометрическим равновесием, воспринимается наблюдателем как исчезновение нити лампы на фоне изображения тела. По достижении фотометрического равновесия отсчитывается яркостная температура объекта измерения. Эту температуру отсчитывают по шкале прибора, градуированной в градусах температуры.

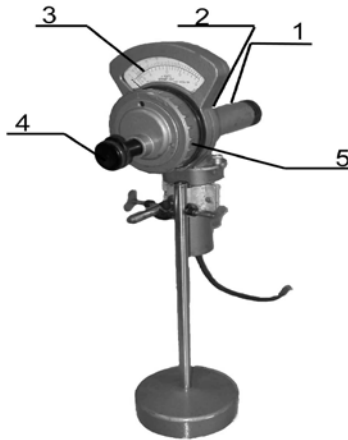


Рис. 16.2.

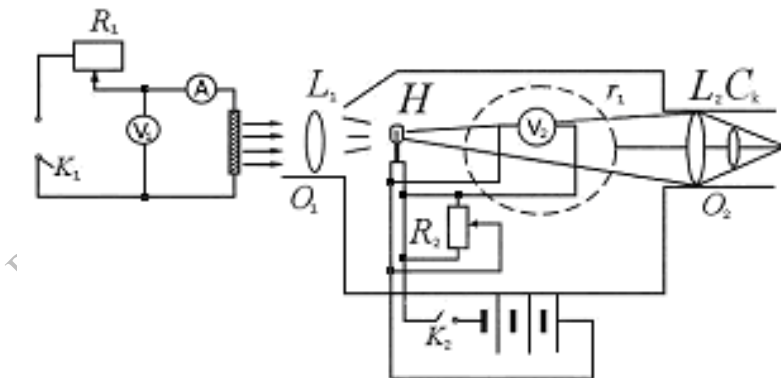


Рис. 16.3.

Оптический пирометр с исчезающей нитью состоит из зрительной трубы  $O_2$ , в фокусе которой находится эталонная лампочка накаливания Н (рис. 16.3). Зрительная труба наводится на источник излучения (раскаленную нихромовую проволоку). При помощи линзы  $L_1$  изображение проволоки сводится в плоскость нити лампы так, чтобы пластинка и нить лампочки были видны одинаково четко. Вторая линза  $L_2$  дает увеличенное изображение нити лампочки и поверхности раскаленной проволоки.

Накал нити пирометра регулируется реостатом путем поворота шайбы пирометра 5 (рис. 16.2). Накал нити лампы должен быть отрегулирован так, чтобы верхняя часть нити исчезла на фоне раскаленной проволоки. В этом случае температуры нити лампочки и раскаленной проволоки будут одинаковы.

Внутри зрительной трубы помещены два светофильтра: красный и дымчатый.

При измерении температур в интервале  $800-1200^{\circ}\text{C}$  пользуются красным светофильтром ( $\lambda=0,65$  мкм), в интервале  $1400-2000^{\circ}\text{C}$  – дымчатым.

Красный светофильтр вводится путем поворота диска 4, который входит в окуляр зрительной трубы пирометра, а дымчатый светофильтр – путем поворота винта 2 на корпусе прибора.

Температура раскаленной нити определяется по гальванометру, проградуированному в градусах Цельсия. Шкала 3 расположена на передней части пирометра и состоит из двух частей: верхней и нижней.

При пользовании красным светофильтром температуру определяют по нижней шкале. Если светофильтр не применяют или пользуются дымчатым светофильтром, то температуру устанавливают по верхней шкале.

Температуру окружающей среды определяют по термометру, силу тока и напряжение - по показаниям амперметра и вольтметра. В работе применяется амперметр переменного тока до 30 А и вольтметр переменного тока до 1,5 В. Для нагрева нихромовой проволоки ее включают в цепь переменного тока.

Изменяя реохордом ЛАТРа ток в цепи проволоки, получают различную степень ее нагретости.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ УПРАЖНЕНИЕ I

### Определение постоянной Стефана-Больцмана

1. Определить площадь поверхности нихромовой проволоки, зная, что ее диаметр  $d = 0.49$  мм, а длина  $l = 15$  мм.
2. Подготовить оптический пирометр к проведению измерений:
  - а) сфокусировать объектив прибора на раскаленную проволоку;
  - б) перемещением тубуса окуляра добиться резкого изображения нити накала.
3. Подать на нихромовую проволоку напряжение  $U_1$  величиной в 1,1 В.
4. С помощью амперметра определить величину тока  $I_1$ .
5. Ввести красный светофильтр ( $\lambda = 650$  нм), поворачивая кольцо 4.
6. Измерить яркостную температуру при данном напряжении. Для этого изменять накал лампы до тех пор, пока нить лампы не исчезнет на фоне раскаленной нихромовой проволоки. По пирометру сделать отсчет температуры.
7. Показания вольтметра, амперметра и измеренной температуры занести в таблицу 1.
8. По формуле (16.20) вычислить значение постоянной Стефана-Больцмана.
9. Аналогичные измерения провести при напряжениях: 1.2В, 1.3В, 1.4В и 1.5В, вычислить для них  $\sigma$ .
10. Из полученных значений найти среднее значение  $\sigma$ .

Таблица 1

№ п/п	U, В	I, А	Т <sub>я</sub> , К	Т <sub>0</sub> , К	σ, $\frac{Вт}{м^2 К^4}$	σ̄, $\frac{Вт}{м^2 К^4}$

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение постоянной Планка

1. Опираясь на данные таблицы 1, произвести расчет постоянной Планка согласно формуле (16.11) в каждом случае.
2. Определить среднее значение постоянной Планка. Оценить погрешность вычислений.
3. Результаты свести в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	h, Дж с	h̄, Дж с	Δh

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Определение радиационных температур

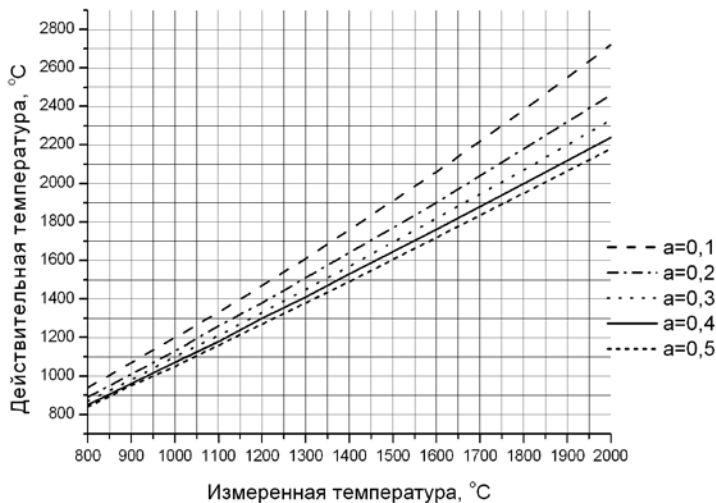
1. С помощью таблиц 4, 5 и графика определить действительные термодинамические температуры по измеренным яркостным.

Таблица 4

Материал	Коэффициент монохроматической излучательной способности материала, $\lambda=0,66$ мкм	
	в твердом состоянии	в жидком состоянии
Вольфрам	0,43	-
Железо	0,35	0,37
Молибден	0,37	0,40
Константан	0,35	
Нихром	0,35	-

Таблица 5

Коэфф. излуч. способности $a$	Измеренные яркостные температуры $^{\circ}\text{C}$ , $\lambda=0,66$ мкм									
	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2000
	Действительные температуры									
0,05	990	1130	1270	1420	1570	1730	1900	2250	2630	3030
0,1	940	1070	1200	1330	1470	1610	1760	2060	2380	2720
0,15	910	1030	1160	1290	1420	1550	1690	1970	2260	2560
0,20	890	1010	1130	1260	1380	1510	1640	1900	2180	2460
0,25	880	1000	1110	1230	1350	1480	1600	1850	2120	2380
0,30	870	980	1100	1210	1330	1450	1570	1820	2070	2330
0,35	860	970	1080	1200	1310	1430	1550	1790	2030	2280
0,40	850	960	1070	1180	1300	1410	1530	1760	2000	2240
0,45	840	950	1060	1170	1280	1400	1510	1740	1970	2210
0,50	840	950	1050	1160	1270	1380	1490	1720	1950	2180
0,55	830	940	1050	1150	1260	1370	1480	1700	1910	2150
0,60	830	930	1040	1150	1250	1360	1470	1690	1910	2130
0,65	820	930	1030	1140	1240	1350	1460	1670	1890	2110
0,70	820	920	1030	1130	1240	1340	1450	1660	1870	2090
0,75	820	920	1020	1130	1230	1330	1440	1650	1860	2070
0,80	810	910	1020	1120	1220	1330	1430	1640	1850	2050
0,85	810	910	1010	1110	1220	1320	1420	1630	1830	2030
0,90	810	910	1010	1110	1210	1310	1410	1620	1820	2030
0,95	800	900	1000	1100	1210	1310	1410	1610	1810	2010
1.00	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1600	1800	2000



2. Произвести расчет радиационных температур  $T_{рад}$  по формуле (16.15), зная, что для нихрома  $a=0,35$ .
3. Все результаты свести в таблицу 6.

Таблица 6.

№ п/п	$T_{я}$ , К	$T$ , К	$T_{рад}$ , К

4. Сделать выводы о точности расчетов.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Тепловое излучение. Правило Прево. Испускательная и поглощательная способность тел. Абсолютно черное тело.
2. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина.
3. Выведите закон Стефана-Больцмана, пользуясь термодинамическим методом.
4. Формула Релея-Джинса. Ультрафиолетовая катастрофа. Формула Планка.
5. Оптическая пирометрия. Радиационная, цветовая и яркостная температуры.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №17

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ПЛАНКА И РИДБЕРГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОХРОМАТОРА УМ-2

Цель работы: Определить постоянные Планка и Ридберга экспериментальным путем.

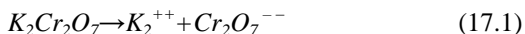
Приборы и принадлежности: монохроматор УМ-2, ртутная лампа с источником питания, водородная трубка с узлом крепления, высоковольтный индуктор, источник питания на 12 В, раствор двуххромовокислого калия, подъемный столик.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Нагретое до определенной температуры тело становится источником излучения электромагнитных волн различной длины, в том числе и оптического диапазона. Спектральный анализ является физическим методом определения качественного и количественного состава вещества на основе изучения его спектра. Спектр вещества показывает распределение энергии исследуемого излучения по частотам (длинам волн). Спектром испускания, или эмиссионным спектром, называется совокупность монохроматических волн, на которые может быть разложено исследуемое излучение. Различают сплошные, полосатые и линейчатые спектры испускания. Сплошной спектр получается при свечении раскаленных твердых и жидких тел; полосатые спектры испускаются возбужденными молекулами газа, поэтому их называют молекулярными спектрами; линейчатые спектры наблюдаются при свечении изолированных атомов, например атомов разреженных газов или паров металла.

Если на окрашенный раствор направить излучение от источника сплошного спектра, то на его фоне образуются темные линии. Такой спектр связан с поглощением веществом отдельных электромагнитных волн и его называют абсорбционным спектром или спектром поглощения.

Спектр поглощения используется для определения постоянной Планка. Направим на кювету с раствором двуххромовокислого калия ( $K_2Cr_2O_7$ ) световой поток. Прохождение света через раствор сопровождается его поглощением. Поглощение света приводит к распаду молекулы двуххромовокислого калия на ионы. Распад происходит по схеме:



Экспериментально найдено, что распад происходит, если молекуле сообщается энергия не менее  $3,97 \times 10^{-19}$  Дж. Следовательно, минимальная энергия фотонов, поглощаемых раствором,  $h\nu = 3,97 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Отсюда

$$h = \frac{3,97 \times 10^{-19} \text{ Дж}}{\nu}, \quad (17.2)$$

где  $\nu$  – минимальная частота.

Учитывая связь частоты с длиной волны ( $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ), имеем:

$$h = \frac{3,97 \times 10^{-19} \lambda}{c} \text{ Дж} \cdot c, \quad (17.3)$$

где  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – наибольшая длина волны в спектре поглощения раствора ( $K_2Cr_2O_7$ ), определенная с помощью монохроматора.

Как указывалось выше, спектром поглощения называется распределение по частотам (длинам волн) интенсивности поглощаемого телом электромагнитного излучения. Спектры поглощения наблюдаются том случае, когда на пути излучения источника, дающего сплошной спектр, оказывается поглощающее вещество. В прошедшем через вещество излучении имеются темные полосы или линии в тех местах, которые соответствуют поглощенному излучению. Характер поглощения определяется природой и строением поглощающего вещества. Линейчатые спектры поглощения получаются в том случае, когда поглощающее вещество состоит из атомов; полосатые -- при поглощении веществом, состоящим из молекул; сплошные связаны с поглощением веществом, находящимся в конденсированном (т.е. твердом и жидком) состоянии.

Длины волн или частоты при обычных условиях получения спектров остаются постоянными, вполне определенными для каждого химического элемента. Качественный спектральный анализ состоит в обнаружении в спектре анализируемого вещества спектральных линий, принадлежащих искомому элементу.

Наиболее простым атомным спектром является спектр легчайшего химического элемента — водорода.

В 1885 году швейцарский физик Бальмер, изучая видимую часть этого спектра, экспериментальным путем установил наличие определенной закономерности, связывающей между собой длины волн отдельных спектральных линий. Им установлена формула:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (17.4)$$

где  $n = 3, 4, 5, \dots$ ,  $R = 1,097 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

Величину

$$k = \frac{1}{\lambda} \quad (17.5)$$

называют *волновым числом*. Оно показывает, сколько длин волн укладывается в 1 м.

Линии в спектре водорода, описываемые формулой (17.4), составляют спектральную серию Бальмера. В видимой области спектра лежат только четыре линии этой серии. В настоящее время обнаружено 29 линий серии Бальмера, 25 из которых лежат в близкой ультрафиолетовой части спектра.

В 1906 году Лайман открыл в далекой ультрафиолетовой области спектра водорода серию линий, описываемых формулой:

$$N = R \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right), \quad (17.6)$$

где  $n = 2, 3, 4, \dots$ .

В 1908 году серию линий в близкой инфракрасной области водородного спектра обнаружил Пашен. Она описывается формулой

$$N = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (17.7)$$

где  $n = 4, 5, 6, \dots$ .

И, наконец, Брэккет (1922г.) и Пфундт (1930г.) нашли еще две серии линий в более далеких областях инфракрасной части спектра водорода. Формулы, описывающие эти серии, имеют вид:

$$N = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где } n = 5, 6, 7, \dots \quad (17.8)$$

$$N = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где } n = 6, 7, \dots \quad (17.9)$$

Если объединить соотношения (17.4), (17.6) – (17.9), то получим универсальную формулу

$$N = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (17.10)$$

где число  $m$  принимает целые значения  $m = 1, 2, 3, \dots$  и определяет серию, число  $n$  удовлетворяет неравенству  $n > m$  и определяет отдельные линии серии. Эти серии приведены на рис. 17.1.

Подставив соотношение (17.5) в (17.10) и учитывая, что  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , получим:

$$\nu = \frac{cR}{m^2} - \frac{cR}{n^2} = T(m) - T(n), \quad (17.11)$$

Отсюда следует вывод, что частоты всех линий в спектре водорода могут быть представлены в виде разности двух функций от целых чисел  $T(m)$  и  $T(n)$ . Эти функции носят название спектральных термов.

Теория спектра водорода базируется на постулатах Бора:

1. Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, реализуются в действительности только некоторые, удовлетворяющие определенным квантовым условиям. Электрон, находящийся в любом из этих состояний, не излучает электромагнитных волн (света).

Для таких стационарных состояний момент количества движения электрона  $mV_k r_k$  кратен целому числу  $\frac{h}{2\pi}$ , т.е.

$$mV_k r_k = n \frac{h}{2\pi}, \quad (17.12)$$

2. Излучение испускается или поглощается в виде светового кванта энергии при переходе электрона из одного стационарного (устойчивого) состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий этих стационарных состояний:

$$h\nu = E_n - E_m. \quad (17.13)$$



Полная энергия (включающая как кинетическую, так и потенциальную) электрона в атоме водорода равна

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m z^2 e^4}{n^2 h^2}, \quad (17.14)$$

где  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл);  $z$  – порядковый номер элемента в таблице Менделеева;  $n$  – номер орбиты, на которой находится электрон.

Введем обозначения:

$$-\frac{2\pi^2 m z^2 e^4}{h^2} = a_0, \quad (17.15)$$

Тогда (17.14) переписывается в виде:

$$E_n = \frac{a_0}{n^2}. \quad (17.16)$$

Подставим (17.16) в (17.13) и получим:

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{a_0}{h} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (17.17)$$

Отсюда

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{a_0}{hc} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (17.18)$$

то есть мы получили формулу, совпадающую с выражением (17.10).

Величину

$$R = \frac{a_0}{hc} = -\frac{2\pi^2 m e^4 z^2}{h^3 c} \quad (17.19)$$

называют постоянной Ридберга. С помощью формулы (17.18), измерив на опыте длины волн видимой части спектра водорода, можно вычислить постоянную Ридберга  $R$ .

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для определения наибольшей длины волны в спектре поглощения водного раствора ( $K_2Cr_2O_7$ ) используют монохроматор УМ-2. Монохроматор (рис. 17.2) установлен на двух оптических рельсах 1.

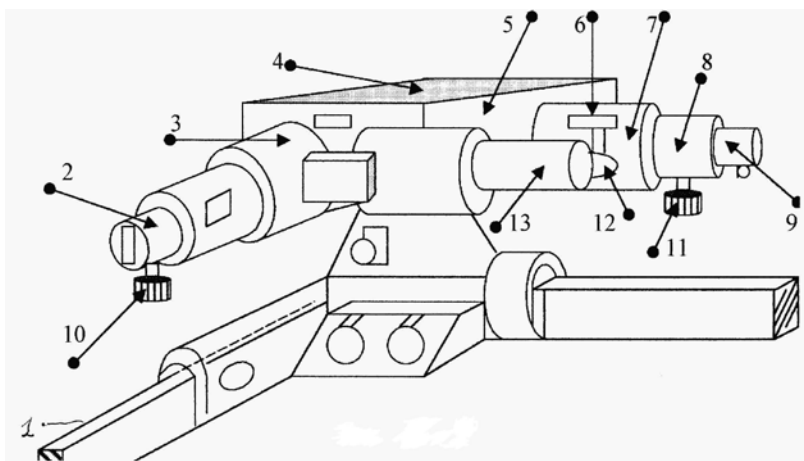


Рис. 17.2.

Он состоит из входной трубы 3 со щелью 2, призмного столика 5 с призмой 4, находящихся внутри корпуса, выходной коллимационной трубы 8 и щели 9. Ширина раскрытия щелей регулируется маховичками 10. Поворот призмы осуществляется барабаном 13. Фокусировка выходной трубы производится маховичками 12.

Положение коллиматора выходной трубы определяется по миллиметровой шкале с нониусом 6. В трубе коллиматора между щелью и окуляром помещен затвор, с помощью которого можно прекратить доступ света в прибор. Управление затвором осуществляется с помощью рукоятки 11.

Оптическая схема монохроматора приведена на рис. 17.3.

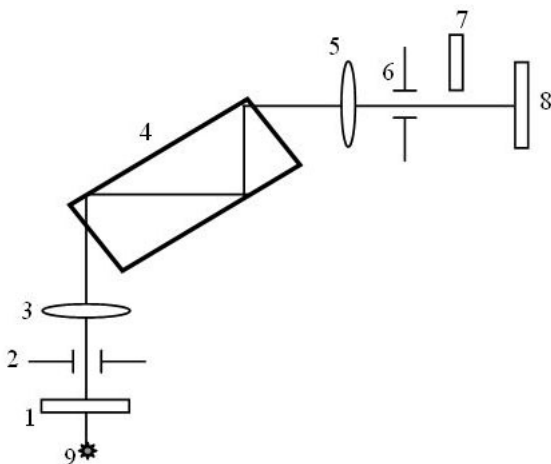


Рис. 17.3.

Луч света от источника 9 через щель 2 и объектив 3 попадает на диспергирующую призму 4 и разлагается в спектр. Призма поворачивает лучи на  $90^\circ$ . На пути пучка света помещается выходная труба монохроматора, состоящая из окуляра 5 и щели 6. Щели закрываются защитными стеклами 1 и 8.

Включение в сеть ртутной лампы и лампы сплошного спектра осуществляется через блок питания.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Устанавливают ртутную лампу на оптический рельс на расстоянии 453 мм от входной щели прибора. Между входной щелью и ртутной лампой помещают ахроматический конденсор с  $f = 94$  мм на расстоянии 130 мм от входной щели. На входную щель надевают насадку с линзой с фокусным расстоянием  $f = 140$  мм. Вращением барабана 10 устанавливают ширину входной щели 0,01 – 0,02 мм. Подсоединяют ртутную лампу к блоку питания, включают тумблер питания.



## УПРАЖНЕНИЕ I

### Градуирование шкалы монохроматора

1. Нажатием кнопки включают ртутную лампу.
2. Направляют свет лампы на щель монохроматора. Перемещением линзы по оптическому рельсу фокусируют излучение лампы на щель прибора.
3. Раскрывают щель выходной трубы и устанавливают окуляр таким образом, чтобы видеть спектр ртутных паров.
4. Вращая барабан 13, совмещают визирную линию с красной линией спектра и снимают отсчет по шкале барабана 13. Аналогично поступают и для других линий спектра.
5. Строят градуировочную кривую монохроматора, откладывая по оси абсцисс длину волны  $\lambda$ , а по оси ординат деления шкалы. Длины волн для спектральных линий ртути различного цвета приведены в таблице.

Цвет линий	Фиоле- товая	Синяя	Св. голу- бая	Зеле- ная	Жел- тая1	Жел- тая2	Крас- ная
$\lambda, \text{ \AA}$	4046	4358	4916	5461	5770	5852	6907

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Определение постоянной Планка

1. Вместо ртутной лампы на оптический рельс помещают лампу сплошного спектра.
2. Между лампой и щелью монохроматора помещают на столике плоскую стеклянную кювету с водным раствором двуххромовокислого калия.
3. Фокусируют на нее излучение лампы.
4. Через выходную трубу окуляра наблюдают сплошной спектр и спектр поглощения двуххромовокислого калия (широкую темную полосу).
5. Снимают отсчет по шкале барабана, соответствующей наибольшей длине волны  $\lambda$ , с которой начинается поглощение (2-3 мм от желтой линии).
6. По градуировочной кривой находят длину волны  $\lambda$ , соответствующую границе поглощения.
7. По формуле (17.3) вычисляют постоянную Планка.

8. Вычисленное значение  $h$  сопоставляют с табличным значением  $h_T=6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Изучение спектра водорода и определение постоянной Ридберга

1. Убирают кювету с раствором двуххромовокислого калия.
2. Вместо лампы сплошного спектра на оптический рельс помещают рейтер с водородной трубкой, соединенной с высоковольтным индуктором.
3. Подключают к высоковольтному индуктору источник питания на 12 вольт.
4. Замыкают ключ высоковольтного индуктора и зажигают водородную трубку.
5. Перемещением линзы по оптическому рельсу фокусируют излучение водородной трубки на щель монохроматора.
6. Вращением барабана 13 выводят в поле зрения выходной трубы монохроматора спектр водорода (спектральную серию Бальмера).
7. Совмещают визирную линию монохроматора с красной линией спектра водорода и снимают отсчет по шкале барабана 13.
8. Аналогичные измерения делают для зеленой и голубой линий спектра водорода.
9. Используя градуировочный график, определяют длины волн линий спектра водорода.
10. По формуле (17.18) вычисляют постоянную Ридберга, соответственно, для красной длины волны, где  $m=2$ , и  $n=3$ ; для зеленой – где  $m=2$ , и  $n=4$ ; и голубой, где  $m=2$ , и  $n=5$ . Следует помнить, что в формулу (17.18) подставляются значения  $\lambda$ , определенные из графика для соответствующих линий спектра водорода.
11. Вычисляют среднее значение постоянной Ридберга  $R$ , сопоставляют его с табличным значением постоянной Ридберга.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяется постоянная Планка в работе?
2. Как образуются спектральные серии в спектре водорода?
3. Как определяется постоянная Ридберга в работе?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №18

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТА

Цель работы: исследовать свойства газонаполненного фотоэлемента.

Приборы и принадлежности: фотоэлемент типа ЦГ-4; эталонная лампа (включается через трансформатор на 6 В); миллиамперметр; потенциометр; вольтметр на 150-300 В; оптическая скамья с ползунком.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Внешним фотоэффектом называется явление испускания электронов с поверхности вещества под действием электромагнитного излучения. Фотоэффект был открыт в 1887 году немецким физиком Г.Герцем. Первые фундаментальные исследования выполнены А.Г.Столетовым (1888), а затем немецким физиком Ф. Ленардом (1899). Первое теоретическое объяснение законов фотоэффекта дал А. Эйнштейн (1905).

Внутренний фотоэффект – перераспределение электронов по энергетическим состояниям в конденсированной среде, происходящее при поглощении электромагнитного излучения.

В неметаллических телах (полупроводниках и диэлектриках) внутренний фотоэффект проявляется в изменении электропроводности, диэлектрической проницаемости среды или в возникновении на ее границах электродвижущей силы. В металлах из-за их высокой электропроводности внутренний фотоэффект неощутим.

На основании обобщения опытных данных установлены следующие основные законы внешнего фотоэффекта:

Экспериментально установлены три основных закона внешнего фотоэффекта, справедливые для любого материала фотоэмиттера:

1) количество электронов, испускаемых в единицу времени (сила фототока в режиме насыщения), пропорционально интенсивности света при неизменном его спектральном составе (закон Столетова);

2) для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует «красная граница» внешнего фотоэффекта  $\nu_0$ , где  $\nu_0$  такая частота света, меньше которой ( $\nu < \nu_0$ ) фотоэлектронная эмиссия не наблюдается;

3) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растет с частотой света и не зависит от его интенсивности (закон Эйнштейна)..

Все эти закономерности находят исчерпывающее объяснение на основе фотонных представлений о свете (М. Планк, 1900г.; А. Эйнштейн, 1905г.).

При облучении вещества светом его электроны получают энергию не непрерывно, а порциями (квантами). Энергия каждой порции равна

$$\varepsilon = h\nu, \quad (18.1)$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $\nu$  - частота световой волны. Позже эти порции энергии света были названы фотонами.

Чем больше интенсивность света определенной частоты, тем больше фотонов с определенной энергией падает на поверхность вещества в единицу времени и, следовательно, больше испускается электронов. Если все испущенные электроны являются носителями электрического тока в цепи (режим тока насыщения), то сила этого тока будет пропорциональна интенсивности света. То есть выполняется закон Столетова.

Если энергии одного фотона не достаточно, чтобы освободить электрон, то фотоэффекта не будет, сколько бы таких фотонов ни падало на вещество. При этом предполагается, что электрон может поглотить только один фотон; вероятность же одновременного поглощения двух и более фотонов ничтожно мала. Следовательно, действительно должна существовать «красная граница» фотоэффекта.

Назовем наименьшую энергию, необходимую для освобождения электрона из данного вещества, работой выхода  $A$ .

Применив закон сохранения энергии для объяснения явления фотоэффекта, Эйнштейн установил соотношение, которое получило название основного уравнения фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mV_{\max}^2}{2}, \quad (18.2)$$

где  $A$  – работа выхода электрона;  $\frac{mV_{\max}^2}{2}$  – максимально возможная

кинетическая энергия выбитых электронов при данной энергии поглощенного фотона  $h\nu$  и работе выхода  $A$ .

Согласно Эйнштейну, каждый фотон взаимодействует только с одним электроном. Энергия фотона полностью передается электрону, при этом часть энергии тратится на совершение работы выхода

электрона из вещества, а оставшаяся часть идет на сообщение ему кинетической энергии.

Так как началу фотоэффекта соответствует условие  $\frac{mV_{\max}^2}{2} = 0$ , то из уравнения Эйнштейна следует выражение для красной границы фотоэффекта:

$$v_{\min} = \frac{A}{h} . \quad (18.3)$$

Выражая из (18.2) максимальную кинетическую энергию электрона, получаем, что она действительно пропорциональна частоте света и не зависит от интенсивности:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = h\nu - A .$$

Если подать на фотоэлемент задерживающее напряжение, то электроны будут тормозиться на пути к аноду. При определенной величине задерживающего напряжения будет выполняться соотношение:

$$eU_3 = \frac{mV_{\max}^2}{2} , \quad (18.4)$$

то есть при таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему при вылете наибольшим значением скорости  $V_{\max}$ , не удастся преодолеть задерживающее поле.

В этом случае даже быстрые электроны не достигают анода. Фототок перестает существовать, и уравнение Эйнштейна (18.2) с учетом соотношения (18.4) может быть записано в виде:

$$h\nu = A + eU_3 . \quad (18.5)$$

При соединении анода с положительным полюсом батареи и при постепенном увеличении напряжения сила тока через фотоэлемент возрастает, так как все большее и большее число электронов притягивается к аноду. Наконец, при некотором напряжении все электроны, вылетающие с катода, будут поступать на анод, дальнейший рост тока прекратится и установится ток насыщения  $I_{\text{нас}}$ .

Примерный вид вольтамперных характеристик, полученных для одинаковой частоты, но различных интенсивностей света, представлен на рис.18.1.

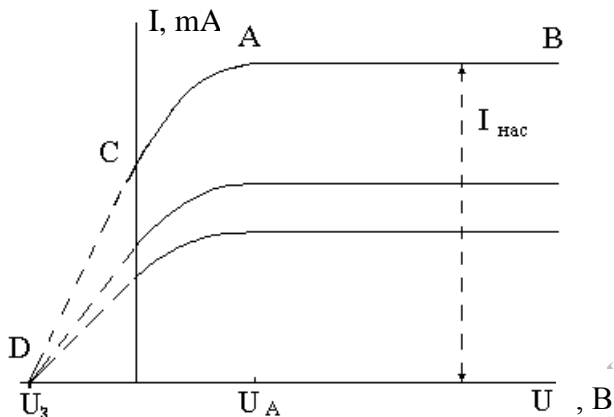


Рис. 18.1.

Участок  $AB$  графика соответствует току насыщения  $I_{\text{нас}}$  фотоэлемента. При этом сила тока при  $U > U_A$  не зависит от напряжения между катодом и анодом, потому что все электроны, выбитые светом в область пространства между катодом и анодом, достигают анода.

При напряжениях  $U < U_A$  электрическое поле между катодом и анодом недостаточно для того, чтобы при данной геометрии фотоэлемента собрать на аноде все выбитые электроны. Сила тока становится меньше  $I_{\text{нас}}$ . Причем при нулевом и даже отрицательном напряжении на аноде сила тока отлична от нуля. Это объясняется тем, что некоторые выбитые фотонами электроны обладают достаточным запасом кинетической энергии, достаточным для того, чтобы даже в тормозящем поле достичь анода (участок графика  $CD$ ).

При некоторой определенной разности потенциалов задерживающего поля  $U_3$  наступает состояние, когда даже самые быстрые из летевших к аноду электронов, не коснувшись его, отбрасываются назад к катоду. Ток через фотоэлемент при этом становится равным нулю (точка  $D$  графика).

На использовании явления внешнего фотоэффекта основана работа вакуумных и газонаполненных фотоэлементов. Основными характеристиками вакуумного фотоэлемента являются его вольтамперная, световая, спектральная характеристики и интегральная чувствительность.

Под вольтамперной характеристикой, упомянутой выше, понимают зависимость силы фототока от приложенного напряжения при неизменном световом потоке  $\Phi = const$ , то есть

$$i = f(U).$$

Световой характеристикой фотоэлемента называется зависимость силы фототока от величины падающего светового потока при неизменном напряжении  $U = const$ , то есть

$$i = f(\Phi) \quad (18.6)$$

где  $\Phi$  – световой поток.

Световой поток равен:

$$\Phi = I \Omega$$

где  $I$  сила света источника,  $\Omega$  - телесный угол, в пределах которого распространяется свет.

Поскольку телесный угол  $\Omega = \frac{S}{R^2}$ , то для светового потока справедливо выражение:

$$\Phi = \frac{IS}{R^2}, \quad (18.7)$$

где  $S$  – площадь светочувствительного слоя фотоприемника, на который опирается телесный угол (в нашем случае - площадь полусферы),  $R$  – расстояние от источника света до фотоэлемента.

Под спектральной характеристикой понимают зависимость силы фототока от длины волны падающего света, то есть

$$i = f(\lambda).$$

Интегральной чувствительностью фотоэлемента  $\gamma$  называется отношение силы фототока  $i$  к величине светового потока  $\Phi$ :

$$\gamma = \frac{i}{\Phi}. \quad (18.8)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для изучения основных характеристик фотоэлемента состоит из оптического рельса, на котором размещаются исследуемый фотоэлемент и источник света (рис. 18.2). Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, на внутреннюю поверхность

которой нанесен слой щелочного металла, служащий катодом. Анод изготовлен в виде металлического кольца (рис. 18.3). Для питания лампы и фотоэлемента применяют источники постоянного тока. Сила фототока измеряется с помощью чувствительного микроамперметра, напряжение — с помощью вольтметра постоянного тока.

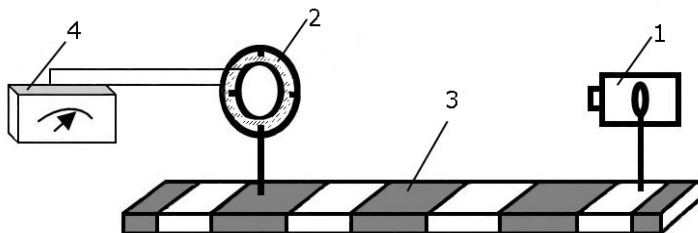


Рис. 18.2.

1. Источник света.
2. Фотоэлемент.
3. Рельс.
4. Миллиамперметр.

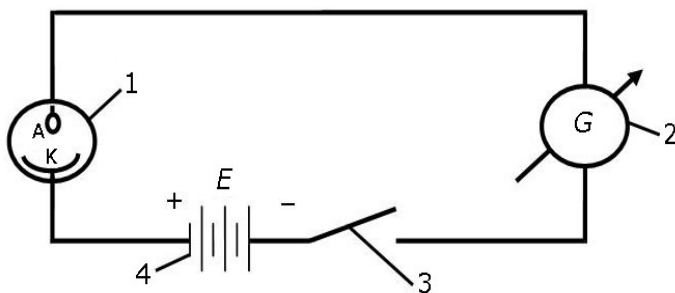


Рис. 18.3.

1. Вакуумный фотоэлемент.
2. Миллиамперметр.
3. Ключ.
4. Батарея.

Помимо вакуумных фотоэлементов, чувствительность которых сравнительно невелика (не превышает нескольких микроампер на люмен), применяются газонаполненные фотоэлементы.

В этом случае в колбу вводится какой-либо нейтральный газ (неон, аргон, гелий) при давлении, равным сотым долям мм. рт. ст.



При достаточных напряжениях между анодом и катодом электроны, вырываемые светом, под действием электрического поля приобретают такую скорость, что оказываются в состоянии ионизировать частицы газа, наполняющего фотоэлемент (ударная ионизация). Ионы, образовавшиеся таким образом, в свою очередь приходят в движение и ионизируют нейтральные частицы газа; в результате к аноду устремляется всё возрастающая лавина электронов, от чего сила фототока значительно увеличивается, и чувствительность фотоэлемента возрастает.

В таком фотоэлементе ток насыщения отсутствует, кривая зависимости тока от напряжения довольно круто поднимается вверх. При некотором напряжении, равном потенциалу ионизации газа, внутри фотоэлемента образуется самостоятельный разряд (фотоэлемент начинает светиться), фототок уже не будет управляться световым потоком, а начнет самостоятельно и неограниченно возрастать, ионы устремляются при этом к катоду и могут его разрушить. Недостатком газонаполненных фотоэлементов является отсутствие строгой пропорциональности между освещенностью катода и силой фототока, а также относительно большая инертность.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

### **УПРАЖНЕНИЕ I**

#### **Изучение световой характеристики фотоэлемента**

Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 18.4).

Для изучения световой характеристики фотоэлемента на оптическую скамью помещают эталонную лампу с силой света 21 кд. Эталонную лампу включают через трансформатор на 6 вольт. Фотоэлемент устанавливается на оптической скамье прозрачной стороной к лампе. Его включают по схеме, где  $R$  – потенциометр, с помощью которого можно менять напряжение на клеммах фотоэлемента;  $V$  – вольтметр, измеряющий напряжение;  $\mu A$  – микроамперметр для измерения фототока (рис.18.4).

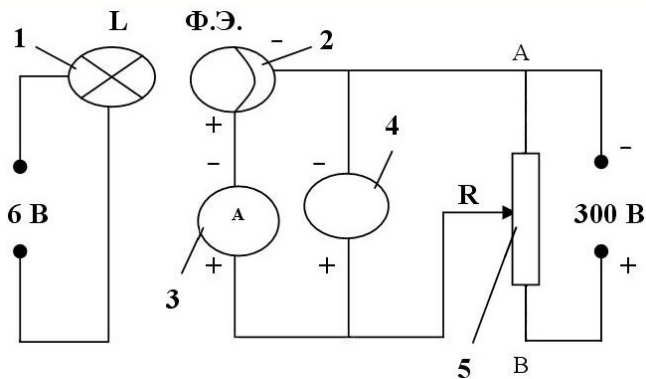


Рис. 18.4.

1. Лампа.
2. Фотоэлемент.
3. Микроамперметр.
4. Вольтметр.
5. Потенциометр.

Световой поток, падающий на фотоэлемент, рассчитывается как

$$\Phi = IW$$

где  $I$  – сила света лампы (21 кд),  $W$  – телесный угол, внутри которого распространяется световой поток, падающий на светочувствительный слой фотоэлемента (рис. 18.5).

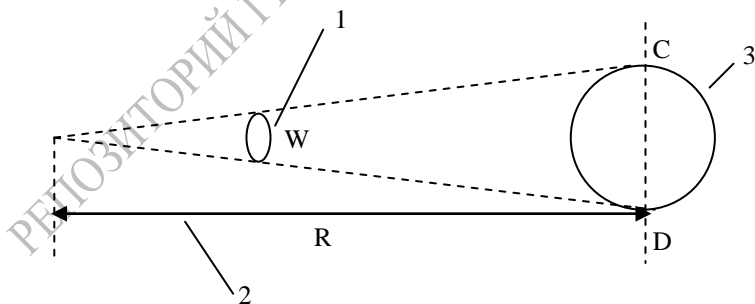


Рис. 18.5.

1. Телесный угол.
2. Расстояние до источника света.
3. Входное отверстие.

Телесный угол, выраженный в стерадианах, равен отношению площади входного отверстия  $S$  (круга), диаметр которого равен  $СД$ , к квадрату расстояния  $R$  до источника света. Следовательно, световой поток равен:

$$\Phi = \frac{IS}{R^2}$$

Определение световой характеристики производят в следующей последовательности:

1. Устанавливают фотоэлемент на расстоянии 10 см от лампы и подают на него напряжение  $V = 70$  В; открывают колпачок, которым обычно закрыт фотоэлемент.

2. Включают лампу на 6 вольт и фотоэлемент по схеме, располагая их центры на одной горизонтали.

3. Записывают показания микроамперметра в делениях шкалы в таблицу, затем зная цену деления микроамперметра, рассчитывают силу фототока в микроамперах и заносят в таблицу.

4. Поддерживая на фотоэлементе постоянное напряжение (70 В), передвигают его на расстояние 15, 20, 25 и т.д. см и производят не менее пяти измерений фототока.

5. Рассчитывают для каждого расстояния световой поток по формуле:

$$\Phi = \frac{IS}{R^2}$$

6. Если площадь светочувствительного слоя для фотоэлемента неизвестна, то измеряют штангенциркулем расстояние  $СД$  и вычисляют площадь круга с диаметром, равным  $СД$  (рис. 18.5).

7. Увеличивают напряжение на фотоэлементе до 100 В и всю серию измерений проводят снова.

8. Строят графики зависимости  $i_{\phi} = f(\Phi)$  для двух напряжений на фотоэлементе.

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Изучение вольтамперной характеристики фотоэлемента

1. Приборы собраны по прежней схеме.

2. Фотоэлемент устанавливается на расстоянии 15 см от лампы.

Изменяя напряжение на лампе через каждые 10 вольт, производят несколько опытов по определению силы фототока, которые вносят в таблицу. Первоначальное напряжение – 30 вольт. Передвинув фотоэлемент на расстояние 20 см, все измерения проводят снова.

3. Строят график зависимости  $i_\varphi = f(U)$ , т.е. вольтамперную характеристику для двух положений фотоэлемента.

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Определение чувствительности фотоэлемента

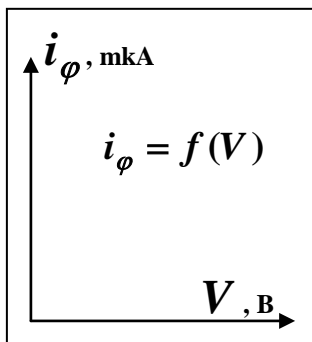
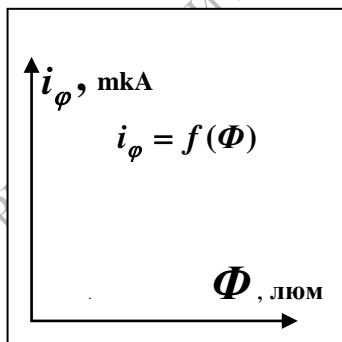
По данным наблюдения, сделанным для снятия световой характеристики, рассчитывают чувствительность фотоэлемента по формуле:

$$\gamma = \frac{i_\varphi}{\Phi}$$

Таблица записи наблюдений.

Световая характеристика			Вольтамперная Характеристика				Определение чувствительности		
$I$	$V$		$S$	$R$					
№	R, см	$I_\varphi$ , $\mu A$	$\Phi$ , люм	№	U, В	n, дел	$i_\varphi$ , А	$\Phi$ , люм	$\gamma$ , $\mu A/\text{люм}$ .

Графики



## УПРАЖНЕНИЕ IV

### Изучение спектральной характеристики фотоэлемента

1. Приборы собраны по прежней схеме.
2. Фотоэлемент устанавливают на расстоянии 10 см от лампы, напряжение устанавливают 70 В.
3. В держатель светофильтров помещают поочередно красный, оранжевый, жёлтый, синий и фиолетовый светофильтры и снимают для них показания микроамперметра.
4. Увеличивают напряжение до 100 В и снимают аналогичные показания.
5. Для двух напряжений (70 и 100 В) строят графики зависимости  $i=f(\lambda)$ , т.е. спектральную характеристику фотоэлемента, соблюдая масштаб.

Данные заносят в таблицу:

№	Марка светофильтра	Длина волны светофильтра, $\lambda$ (нм)	70 В	100 В
			$i_1$	$i_2$
1	КС-13	700		
2	ОС-13	650		
3	ЖС-13	600		
4	ЗС-13	540		
5	СС-13	400		
6	ФС-13	380		

*Примечание.* Под длиной волны светофильтра  $\lambda$  следует понимать максимум спектральной кривой коэффициента пропускания селено-кадмиевых стекол толщиной 5 мм.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключается явление фотоэффекта?
2. Работа выхода электрона. Уравнение Эйнштейна.
3. Законы фотоэффекта.
4. Можно ли объяснить фотоэффект с точки зрения классической электродинамики?
5. Устройство и принцип действия фотоэлемента.
6. Чем объяснить наличие тока насыщения в вакуумных фотоэлементах?
7. Дайте определение потока световой энергии, силы света, освещённости. В каких единицах они измеряются?
8. Будет ли ток насыщения у газонаполненных элементов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19

### ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: изучение элементов зонной теории, устройства и основных характеристик полупроводникового фотоэлемента и фотосопротивления.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, осветитель типа ОИ-224, полупроводниковый фотоэлемент, фотосопротивление типа ФСК-1, микроамперметр с пределом шкалы 100 мкА, вольтметр ВК7-10А, набор светофильтров, соединительные провода.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Все твердые тела по электропроводности делятся на проводники, полупроводники и изоляторы. Благодаря ряду уникальных свойств особый интерес представляют полупроводниковые материалы. К таким свойствам полупроводника относится уменьшение его сопротивления с увеличением температуры, освещенности.

К полупроводникам относятся: селен, германий, кремний, теллур, а также ряд окислов, сульфидов и карбидов.

Свойства полупроводника можно объяснить, исходя из зонной теории твердого тела.

Энергия валентных электронов в кристалле изменяется квазинепрерывно. Это означает, что спектр разрешенных значений энергии состоит из множества близкорасположенных дискретных уровней. В действительности валентные электроны в кристалле движутся не вполне свободно – на них действует периодическое поле решетки. Это обстоятельство приводит к тому, что спектр возможных значений энергии валентных электронов распадается на ряд чередующихся разрешенных и запрещенных зон (рис. 19.1). В пределах разрешенных зон энергия изменяется квазинепрерывно. Значения энергии, принадлежащие запрещенным зонам, не могут реализоваться.

Чтобы понять происхождение зон, рассмотрим воображаемый процесс объединения атомов в кристалл. Пусть первоначально имеется  $N$  изолированных атомов какого-либо вещества. Пока атомы изолированы друг от друга, они имеют полностью совпадающие схемы энергетических уровней. Заполнение уровней электронами осуществляется в каждом атоме независимо от заполнения аналогичных уровней в других атомах. По мере сближения атомов между ними возникает все усиливающееся взаимодействие, которое

приводит к изменению положения уровней. Вместо одного одинакового для всех  $N$  атомов уровня возникают  $N$  очень близких, но не совпадающих уровней. Таким образом, каждый уровень изолированного атома расщепляется в кристалле на  $N$  густо расположенных уровней, образующих полосу или зону.

Величина расщепления для разных уровней не одинакова. Сильнее возмущаются уровни, заполненные в атоме внешними электронами. Уровни, заполненные внутренними электронами, возмущаются мало.

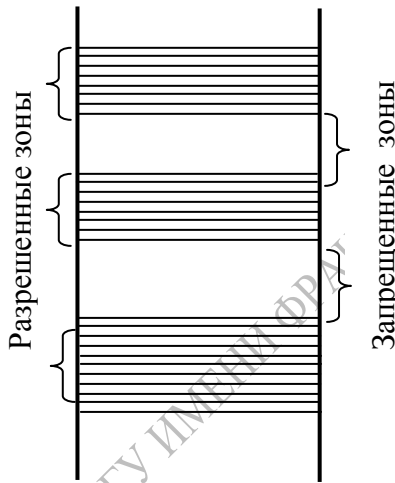


Рис. 19.1.

Итак, спектр возможных значений энергии валентных электронов в кристалле распадается на ряд разрешенных и запрещенных зон. Ширина зон не зависит от размеров кристалла. Таким образом, чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Ширина разрешенных зон имеет величину порядка нескольких электронвольт. Следовательно, если кристалл содержит  $10^{23}$  атомов/см<sup>3</sup>, расстояние между соседними уровнями в зоне составляет  $\sim 10^{-23}$  эВ.

На любом разрешенном уровне могут находиться два электрона, обладающие противоположными спинами, эти электроны находятся в различных квантовых состояниях.

Существование энергетических зон позволяет объяснить с единой точки зрения существование металлов, полупроводников и диэлектриков.

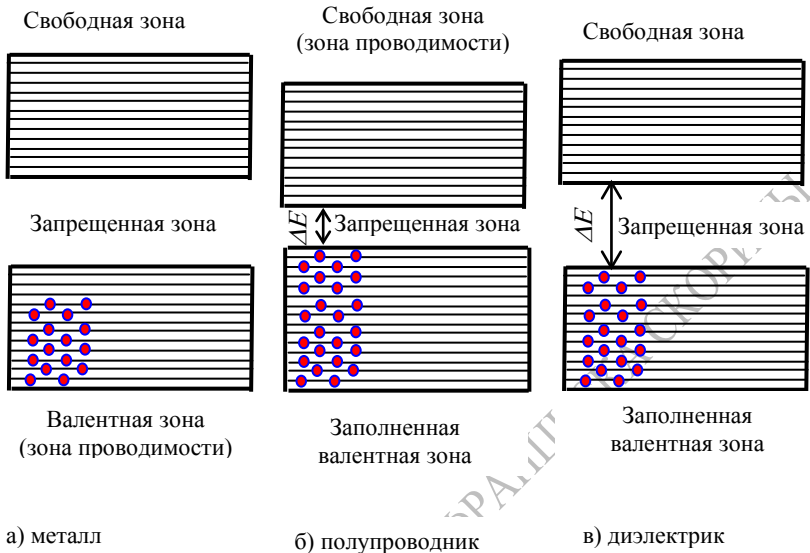


Рис. 19.2.

Разрешенную зону, возникшую из того уровня, на котором находятся валентные электроны в основном состоянии атома, мы будем называть валентной зоной. При абсолютном нуле температуры валентные электроны заполняют попарно нижние уровни валентной зоны. Более высокие разрешенные зоны будут от электронов свободны. В зависимости от степени заполнения валентной зоны электронами и ширины запрещенной зоны возможны три случая, изображенные на рис. 19.2.

В случае а) электроны заполняют валентную зону не полностью. Поэтому достаточно сообщить электронам, находящимся на верхних уровнях, совсем небольшую энергию ( $\sim 10^{-23} \div 10^{-22}$  эВ) для того, чтобы перевести их на более высокие уровни. Энергия теплового движения (кТ) составляет при температуре 1К величину порядка  $10^{-4}$  эВ. Следовательно, при температурах, отличных от абсолютного нуля, часть электронов переводится на более высокие уровни. Дополнительная энергия, вызванная действием на электрон электрического поля, также оказывается достаточной для перевода



электрона на более высокие уровни. Поэтому электроны могут ускоряться электрическим полем и приобретать дополнительную скорость в направлении, противоположном направлению поля. Таким образом, кристалл с подобной схемой энергетических уровней будет представлять собою металл.

Частичное заполнение валентной зоны (в случае металла ее называют также зоной проводимости) наблюдается в тех случаях, когда на последнем занятом уровне в атоме находится только один электрон или когда имеет место перекрывание зон. В первом случае  $N$  электронов проводимости заполняют попарно только половину уровней валентной зоны. Во втором случае число уровней в зоне проводимости будет больше  $N$ , так что, даже если количество электронов проводимости равно  $2N$ , они не смогут занять все уровни зоны.

В случаях б) и в) (см. рис. 19.2) уровни валентной зоны полностью заняты электронами — зона заполнена. Для того, чтобы увеличить энергию электрона, необходимо сообщить ему количество энергии, не меньшее, чем ширина запрещенной зоны  $\Delta E$ . Электрическое поле (во всяком случае такой напряженности, при которой не происходит электрический пробой кристалла) сообщить электрону такую энергию не в состоянии. При этих условиях электрические свойства кристалла определяются шириной запрещенной зоны  $\Delta E$ . Если эта ширина невелика (порядка нескольких десятых электронвольта), энергия теплового движения оказывается достаточной для того, чтобы перевести часть электронов в верхнюю свободную зону. Эти электроны будут находиться в условиях, аналогичных тем, в которых находятся валентные электроны в металле. Свободная зона окажется для них зоной проводимости. Одновременно станет возможным переход электронов валентной зоны на ее освободившиеся верхние уровни. Такое вещество называется электронным полупроводником.

Если ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  велика (порядка нескольких электронвольт), тепловое движение не сможет перевести в свободную зону заметное число электронов. В этом случае кристалл является диэлектриком.

Если ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  не очень велика, то дополнительная энергия может быть сообщена за счет световой энергии. При поглощении световой энергии некоторые электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости и под действием электрического поля начинают в ней перемещаться, обуславливая возникновение электрического тока. В валентной же зоне образуются

вакантные состояния, получившие название дырок. Во внешнем электрическом поле на освободившееся от электрона место – дырку – может переместиться электрон с соседнего уровня, а дырка появится в том месте, откуда ушел электрон, и т. д. Такой процесс заполнения дырок электронами равносителен перемещению дырки в направлении, противоположном движению электрона, так, как если бы дырка обладала положительным зарядом, равным по величине заряду электрона.

Проводимость полупроводника, обусловленная движением электронов в зоне проводимости, называется “электронной проводимостью”. Дырочная проводимость обусловлена движением дырок в валентной зоне. В чистом полупроводнике одновременно существуют электронная и дырочная проводимость. Их называют собственной проводимостью полупроводников.

При введении в кристаллическую решетку полупроводника атомов примеси образуются дополнительные энергетические уровни. Если заполненные электронами энергетические уровни примеси располагаются вблизи зоны проводимости, то из них электроны легко могут переходить в зону проводимости, обуславливая электронную проводимость или так называемую “n” – проводимость полупроводника. Такой полупроводник получил название полупроводника n – типа, а дополнительные уровни – донорных уровней (рис. 19.3а). Если же незаполненные электронами уровни примеси располагаются вблизи валентной зоны, то электроны из валентной зоны легко переходят на эти уровни. В валентной зоне образуются дырки, которые обуславливают дырочную проводимость или проводимость p – типа. Такой примесный полупроводник называют полупроводником p – типа, а дополнительные уровни примеси – акцепторными уровнями (рис. 19.3б).

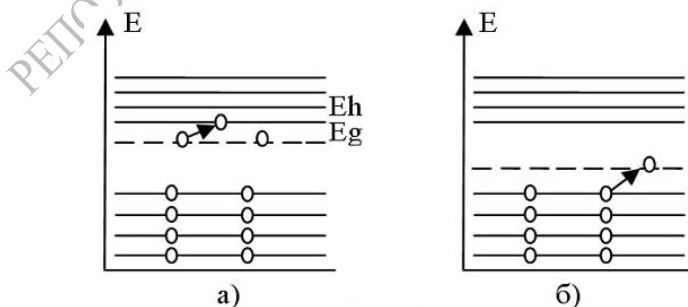


Рис. 19.3.

При соединении двух полупроводников с  $n$  и  $p$  – проводимостью в месте контакта образуется тонкий запирающий слой толщиной  $10^{-3} - 10^{-5}$  см. Этот слой обладает односторонней проводимостью. При отсутствии внешнего электрического поля он свободно пропускает электроны из  $p$  – полупроводника в  $n$  – полупроводник. Дырки беспрепятственно проходят в обратном направлении. При наличии внешнего поля сила тока очень сильно зависит от направления этого поля, то есть  $p$ - $n$  переход обладает односторонней проводимостью.

Важной особенностью полупроводников является способность увеличивать электропроводность под действием света. Это явление получило название внутреннего фотоэффекта, или фотопроводимости. Полупроводник, меняющий свою проводимость при освещении его светом, называется фотоспротивлением. Уменьшение сопротивления полупроводника, обусловленное поглощением света, объясняется увеличением числа свободных носителей заряда.

Внутренний фотоэффект заключается в том, что под действием света происходит перераспределение электронов по энергетическим уровням.

Если энергия кванта  $h\nu$  превышает ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ , поглотивший квант электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости. В результате появляется дополнительная пара носителей зарядов - электрон и дырка, что приводит к увеличению электропроводности вещества.

Если в веществе есть примеси, то под действием света с энергией кванта  $h\nu \geq \Delta E$ , где  $\Delta E$  - энергия активации примеси, электроны могут переходить из валентной зоны на уровни примеси или с примесных уровней в зоны проводимости. В первом случае возникает дырочная проводимость, во втором - электронная.

Носители тока, возникшие в результате освещения, называются неравновесными, или избыточными.

На внутреннем фотоэффекте основана работа фотоспротивлений, непосредственно преобразующих световую энергию в энергию электрическую.

В случае малых световых потоков  $\Phi$ , когда кванты света идут на образование избыточных носителей, количество образующихся носителей, а, следовательно, и величина фототока пропорциональны падающему световому потоку ( $i \sim \Phi$ ). При больших световых потоках наступает насыщение, и линейная зависимость фототока от светового потока нарушается ( $i \sim \Phi^{1/2}$ ).

Световой характеристикой фотосопротивления называется зависимость фототока от светового потока при данном напряжении. Эта зависимость, показана на рис.19.4.

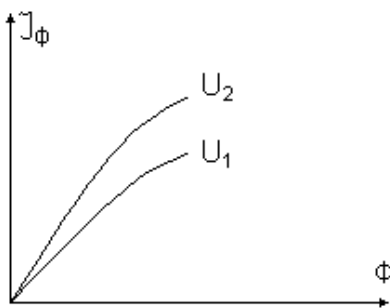


Рис. 19.4.

Вольтамперная характеристика фотосопротивления имеет линейный характер (рис. 19.5) и выражает зависимость фототока от приложенного напряжения при неизменном световом потоке.

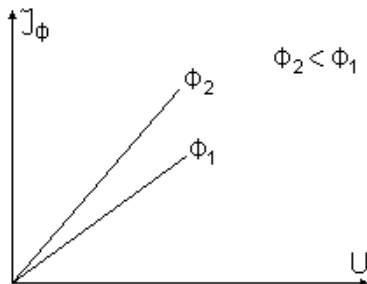


Рис. 19.5.

Спектральной зависимостью фотопроводимости называется зависимость фототока от длины волны падающего излучения. Аналогичными характеристиками обладает и полупроводниковый фотоэлемент. Удельной интегральной чувствительностью  $\gamma_0$  фотосопротивления называется физическая величина, численно равная отношению величины фототока  $i$ , даваемого сопротивлением, к величине падающего на него светового потока  $\Phi$  при напряжении  $U_0$ , приложенном к сопротивлению:

$$\gamma_0 = \frac{i}{\Phi U_0} \quad . \quad (19.1)$$

Учитывая, что

$$\Phi = ES = \frac{I}{r^2} S, \quad (19.2)$$

для  $\gamma_0$  получим

$$\gamma_0 = \frac{ir^2}{ISU_0} \quad , \quad (19.3)$$

где  $r$  – расстояние от источника света до фотоэлемента;  $I$  – сила света источника;  $S$  – рабочая площадь светочувствительного слоя фотоэлемента.

Основной характеристикой полупроводникового фотоэлемента, наряду с вышеперечисленными, является также его интегральная чувствительность. Под интегральной чувствительностью полупроводникового фотоэлемента понимают отношение силы фототока к величине падающего светового потока, т.е.

$$\gamma = \frac{i'}{\Phi} \quad , \quad (19.4)$$

где  $i' = i - i_0$ ,  $i$  – фототок, вызванный данным элементом,  $i_0$  – темновой ток, т.е. ток, показываемый амперметром при выключенном источнике света.

Учитывая формулу (19.2), для  $\gamma$  имеем:

$$\gamma = \frac{i' r^2}{IS} \quad , \quad (19.5)$$

где  $r$  – расстояние от источника света до фотоэлемента;  $S$  – площадь светочувствительного слоя фотоэлемента;  $I$  – сила света источника.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе исследуются основные характеристики фотосопротивлений типа ФСК-1 и ФСК-2, а также полупроводникового фотоэлемента. Установка для проведения исследований состоит из оптического рельса, на котором размещены осветитель типа ОИ-24 с ирисовой диафрагмой и исследуемые фотоэлементы. Величина фотосопротивления измеряется с помощью

вольтметра типа ВК7-10А. Внешний вид передней стенки прибора показан на рис. 19.6.

Вольтметр ВК7-10А – электронно-цифровой прибор, служащий для измерения постоянного и переменного напряжений и сопротивлений. Прибор имеет переключатель 1 пределов измеряемых величин: напряжений на постоянном и переменном токах – 10, 100, 1000 В и сопротивлений 1, 10, 100 кОм, 1 МОм; переключатель вида напряжений и измеряемых величин 2, сетевой выключатель 3, переключатель режимов работы 4. Измеряемые величины подключаются специальным разъёмом к гнезду 5, гнезда 6 служат для калибровки прибора на соответствующих пределах измерения. Отсчёт измеряемой величины производится с помощью электронного табло 7.

Сила фототока полупроводникового фотоэлемента измеряется с помощью микроамперметра стрелочного типа с пределом измерения 200 мкА.

Фотосопротивление ФСК состоит из стеклянной пластинки, на которую нанесён слой полупроводника. На два противоположных края этого слоя наложены электроды, с помощью которых фотосопротивление включается в электрическую цепь. Для защиты от повреждений фотосопротивление помещают в чехол из пластмассы. Если фотосопротивление не освещено, то величина его сопротивления очень велика (темновое сопротивление).

Полупроводниковый фотоэлемент состоит из контакта двух разнородных полупроводников р-типа и n-типа, нанесённых на стеклянную подложку. В месте контакта образуется тонкий запирающий слой. При освещении места контакта начинается перемещение электронов из полупроводника р-типа в полупроводник n-типа. В то же время дырки не могут преодолеть контактную разность потенциалов и остаются в р-полупроводнике. В результате возникает фото-эдс. Присоединение к потребителю полупроводникового фотоэлемента осуществляется с помощью электродов, наложенных на р- и n-слои. Для защиты от повреждений всё устройство помещено в пластмассовый корпус.

Спектральный состав излучения изменяется с помощью светофильтров.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Включают вольтметр тумблером 3 в сеть и дают прогреться в течение 30 мин. Переключатель 1 устанавливают в положение 10 кОм, переключатель 2 в положение "установка нуля".

2. После прогрева с помощью шлица «калибровка 10 кОм» установить нулевое показание шкалы. Затем перевести переключатель 2 в положение R.

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Исследование световой характеристики фотосопротивления

1. На оптической скамье размещают осветитель и исследуемое фотосопротивление, которое специальным разъёмом соединяют с гнездом 5 вольтметра.
2. Открывают полностью ирисовую диафрагму осветителя.
3. Устанавливают расстояние от центра лампы осветителя до фотосопротивления, равное 10 см, и измеряют величину  $R_{\phi}$ .
4. Изменяя расстояние  $r$  через каждые 5 см, измеряют для каждого из них своё значение  $R_{\phi}$ .
5. По формуле (19.2) для каждого  $r$  вычисляют величину светового потока.

Площадь светочувствительного слоя для ДСК-1  $S_1=10,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>, для ФСК-2  $S_2=29,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

6. По полученным данным строят световую характеристику фотосопротивления, т.е. зависимость  $R_{\phi}=f(\Phi)$ .
7. Аналогично измерения проводят и с другим фотосопротивлением.

### УПРАЖНЕНИЕ II

#### Снятие спектральной характеристики фотосопротивления

1. Устанавливают фотосопротивление на расстоянии 20 см осветителя. Диафрагма полностью раскрыта.
2. Помещают перед ирисовой диафрагмой различные светофильтры (фиолетовый, синий, зелёный, жёлтый, оранжевый, красный) и снимают для них значения  $R_{\phi}$ .
3. Строят спектральную характеристику фотосопротивления, т.е. зависимость  $R_{\phi}=f(\lambda)$ . Длины волн светофильтров указаны в таблице.
4. Аналогичные измерения проводят и для другого сопротивления.

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Исследование световой характеристики полупроводникового фотоэлемента

1. Вместо фотосопротивления помещают на оптический скамье полупроводниковый фотоэлемент и соединяют его с

микроамперметром. При этом следят за тем, чтобы плюс фотоэлемента был присоединён к плюсу микроамперметра.

2. Устанавливают фотоэлемент на расстоянии 10 см от осветителя. Диафрагма полностью открыта. Осветитель выключен.
3. Открыв фотоэлемент, определяют его темновой ток  $i_0$ .
4. Включают осветитель в сеть и измеряют величину фототока  $i$ . Фототок, вызванный исследуемым источником света, равен  $i' = i - i_0$ .
5. Измеряют диаметр рабочей части фотоэлемента, вычисляют площадь его рабочей части и по формуле (19.2) подсчитывают величину светового потока  $\Phi$ .
6. Измеряют через каждые 10 см расстояние  $r$  и находят для них свое значение фототока  $i'$ . Вычисляют для этих расстояний величину светового потока  $\Phi$ .
7. Строят график зависимости  $i' = f(\Phi)$ , т.е. световую характеристику фотоэлемента.

#### УПРАЖНЕНИЕ IV

##### Определение спектральной характеристики полупроводникового фотоэлемента

1. На пути светового пучка помещают поочерёдно синий, зелёный, жёлтый, оранжевый, красный светофильтры.
2. Включают осветитель и измеряют для них величину фототока.
3. Строят график зависимости фототока  $i'$  от длины волны  $\lambda$ , т.е. спектральную характеристику фотоэлемента  $i' = f(\lambda)$ , взяв значение  $\lambda$  из таблицы в конце описания, и делают вывод.

##### ТАБЛИЦА ДЛИН ВОЛН СВЕТОФИЛЬТРОВ

1. КС-13 - 700 нм	4. ЗС - 540 нм
2. ОС-13 - 650 нм	5. СС - 400 нм
3. ЖС-18 - 600 нм	6. ФС - 380 нм

*Примечание.* Под длиной волны светофильтра  $\lambda$  следует понимать максимум спектральной кривой коэффициента пропускания селенокадмиевых стекол толщиной 5 мм.

Площадь светочувствительного слоя полупроводникового фотоэлемента вычисляется по формуле площади круга, после предварительного измерения диаметра рабочей части фотоэлемента

$$S = \pi R^2.$$

Сила света лампы рассчитывается по формуле



$$I = \frac{W}{4\pi A},$$

где  $W$  – мощность лампы осветителя,  $A=0,0016$  Вт/лм – механический эквивалент света.

### УПРАЖНЕНИЕ V

#### Определение интегральной чувствительности полупроводникового фотоэлемента

1. При фиксированном расстоянии  $r$  измеряют величину фототока  $i$ .
2. Воспользовавшись результатами предыдущего вычисления площади  $S$ , по формуле (19.5) вычисляют интегральную чувствительность фотоэлемента  $\gamma$ .
3. Аналогичные измерения проводят при других значениях  $r$  и для них вычисляют своё значение  $\gamma$ .
4. Находят среднее значение интегральной чувствительности  $\gamma$ .

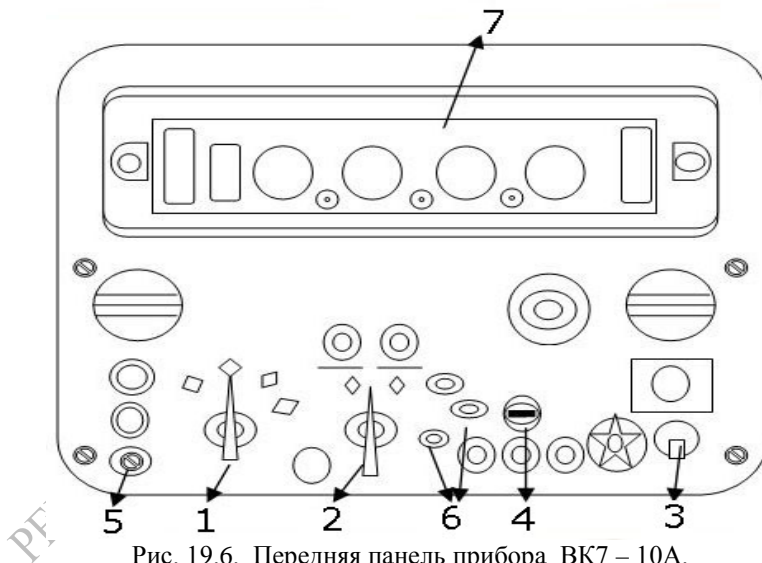


Рис. 19.6. Передняя панель прибора ВК7 – 10А.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Внутренний фотоэффект и его особенности.
2. Вентильный фотоэффект (фотогальванический эффект).
3. Практические применения фотоэффекта.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №20

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ, ОТРАЖЕНИЯ, ЯРКОСТИ И БЛЕСКА РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: ознакомиться с принципом работы фотоэлектрических приборов и научиться определять коэффициенты пропускания, отражения, яркости и блеска различных материалов.

Приборы и принадлежности: фотометр ФМ-58, источник питания, набор образцов, набор приспособлений.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

При падении световой волны на границу раздела двух прозрачных сред часть света отражается, часть проходит во вторую среду, а часть поглощается. Явления отражения, поглощения и пропускания света характеризуются с помощью соответствующих коэффициентов.

Коэффициенты отражения  $R$ , поглощения  $k$  и пропускания  $t$  определяются как отношения интенсивностей соответственно отраженного  $I_R$ , поглощенного  $I_k$ , прошедшего  $I_t$  света к интенсивности падающего света  $I_0$ , то есть

$$R = \frac{I_R}{I_0}; \quad k = \frac{I_k}{I_0}; \quad t = \frac{I_t}{I_0} \quad (20.1)$$

На основании закона сохранения энергии можно записать

$$I_0 = I_R + I_k + I_t \quad (20.2)$$

Решая совместно уравнения (20.1) и (20.2), получим

$$R + k + t = 1 \quad (20.3)$$

то есть сумма коэффициентов отражения, поглощения и пропускания равна 1.

Если поглощение мало, то  $k$  можно принять равным 0, тогда  $R + t = 1$ . Наоборот, если тело непрозрачно, то  $t=0$  и тогда  $R + k = 1$ .

Идеально белым телом называется такое тело, у которого коэффициент отражения  $R$  равен 1. Поэтому  $R$  характеризует степень белизны, а величина  $k=1-R$  характеризует степень черноты тела.

Френель предложил естественную световую волну разложить на две составляющие:  $(\perp \text{ и } \parallel)$ , у которых вектор напряженности

электрического поля  $\vec{E}$  совершает колебания соответственно в плоскости, перпендикулярной к плоскости падения волны, и в плоскости падения волны (рис.20.1).

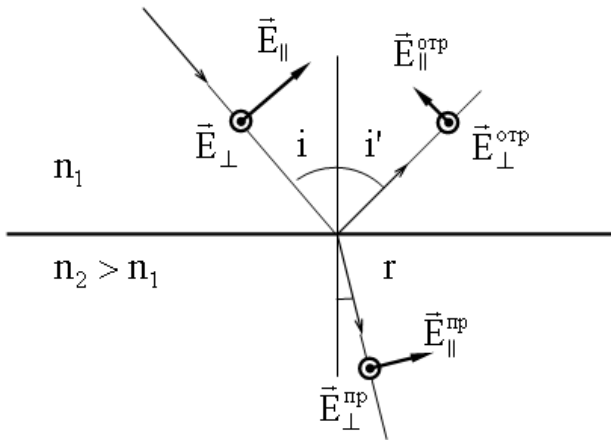


Рис.20.1

На рисунке изображены и обозначены соответствующими значками ( $\perp$  и  $\parallel$ ) составляющие векторов напряженности электрического поля падающей волны ( $\vec{E}_{\perp}$  и  $\vec{E}_{\parallel}$ ), отраженной волны ( $\vec{E}_{\perp}^{\text{отр}}$  и  $\vec{E}_{\parallel}^{\text{отр}}$ ), преломленной волны ( $\vec{E}_{\perp}^{\text{пр}}$  и  $\vec{E}_{\parallel}^{\text{пр}}$ ).

Относительные значения этих величин следуют из граничных условий, налагаемых на электрическое и магнитное поле световой волны.

Формулы, связывающие компоненты векторов  $\vec{E}$ , были впервые получены О. Френелем и носят название формул Френеля:

$$E_{\perp}^{\text{отр}} = -E_{\perp} \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \quad E_{\parallel}^{\text{отр}} = E_{\parallel} \frac{\text{tg}(i-r)}{\text{tg}(i+r)}$$

$$E_{\perp}^{\text{пр}} = E_{\perp} \frac{2\cos i \cdot \sin r}{\sin(i+r)} \quad E_{\parallel}^{\text{пр}} = E_{\parallel} \frac{2\cos i \cdot \sin r}{\sin(i+r) \cdot \cos(i-r)}$$

где  $i$  – угол падения,  $r$  – угол преломления,  $E_{\perp}$ ,  $E_{\parallel}$  – амплитудное

значение ( $\perp$  и  $\parallel$ ) составляющих вектора  $\vec{E}$  падающей волны.

Учитывая, что интенсивность света равна усредненному по времени наблюдения количеству электромагнитной энергии, проходящей через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения света, в единицу времени, можно показать, что она пропорциональна квадрату амплитуды колебаний  $I \sim E^2$ .

Используя формулы Френеля, можно найти интенсивность отражённой  $(I_{\perp}^{omp}, I_{\parallel}^{omp})$  и преломленной  $(I_{\perp}^{np}, I_{\parallel}^{np})$  волн через соответствующие коэффициенты R и T.

Коэффициент отражения неразрывно связан с коэффициентом яркости В. Коэффициентом яркости поверхности называют отношение яркости светорассеивающей поверхности к яркости «идеального рассеивателя», находящегося в тех же условиях освещения.

За «идеальный рассеиватель» принимают поверхность, отражающую весь падающий на неё световой поток. В качестве такого «идеального рассеивателя» обычно берут баритовую пластинку. Близок к ней по отражению лист белой бумаги.

В том случае, когда измеряемый образец и баритовая пластинка имеют одинаковые рассеивающие свойства, коэффициент отражения образца определяется из выражения

$$R = BR_n \quad (20.4)$$

где R – коэффициент отражения образца, В – отношение коэффициента яркости образца к яркости баритовой пластинки,  $R_n$  – коэффициент отражения баритовой пластинки.

Блеск испытуемой поверхности характеризуется коэффициентом  $\gamma(\alpha)$ , который равен отношению коэффициентов яркости образца при углах  $\alpha$  и  $0^0$ , то есть

$$\gamma(\alpha) = \frac{B_{\alpha}}{B_0} \frac{1}{P} \quad (20.5)$$

где  $B_{\alpha}$  – коэффициент яркости образца при наклоне на угол  $\alpha$ ;  $B_0$  – коэффициент яркости образца при угле  $0^0$ ; P – поправка, учитывающая изменение яркости испытуемого образца, происходящее при углах от  $0^0$  до  $45^0$ ,

$$P = \frac{\cos(45^0 - \alpha)}{\cos 45^0} \quad (20.6)$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе измерение отражения света твердыми телами выполняется с помощью универсального фотометра ФМ-58 (рис. 20.2).

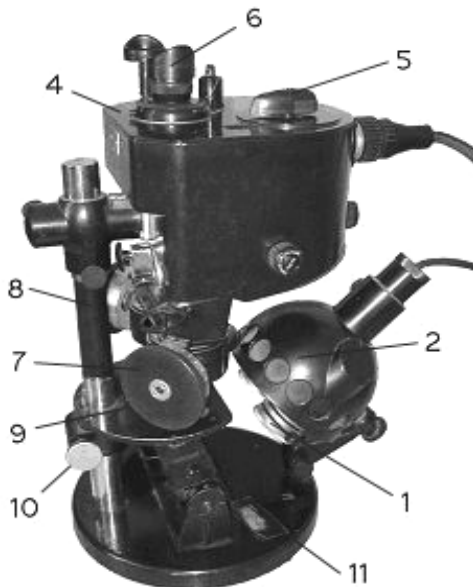


Рис. 20.2.

Фотометр ФМ-58 состоит из следующих узлов: фотометрической головки 4, револьверного диска 5 с одиннадцатью светофильтрами, штатива 8, предметного столика 9, который может перемещаться вверх и вниз при помощи кремальеры 10, плоского зеркала, помещенного на держатель 11, осветителя 2 с двумя конденсорами 1.

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

Два параллельных световых пучка, выходящих из осветителя, отразившись от зеркала, попадают в окуляр 6, пройдя через диафрагмы фотометрической головки. Степень раскрытия диафрагмы регулируется поворотом барабанов 7, имеющих черную и красную шкалы. По черной шкале измеряют коэффициент отражения и пропускания, по красной – оптическую плотность вещества. При этом пучок света от левого конденсора освещает правую половину поля

зрения в окуляре, а пучок света от правого конденсора освещает левую половину поля зрения.

На пути световых пучков помещают по мере надобности светофильтры, номера которых видны в прорези револьверного диска.

В окуляре наблюдается поле зрения в форме круга, разделенного линией на две половины. При условии, что обе диафрагмы одинаково освещены и в одинаковой мере раскрыты, яркость обеих половин поля зрения будет также одинаковой.

Если на пути одного светового пучка поместить пластинку из какого-либо вещества, частично поглощающего свет, фотометрическое равновесие нарушится. Одна половина поля зрения станет темнее. Чтобы уравнять поля, необходимо уменьшить яркость поля того пучка, куда не внесено вещество. Это осуществляется изменением отверстия диафрагмы путем вращения одного из барабанов 7.

Черная шкала показывает в процентах отношение площади отверстия диафрагмы при данном ее раскрытии к площади ее максимального раскрытия. Так как световой поток равномерного пучка света пропорционален площади раскрытия диафрагмы, то показания черной шкалы дают непосредственно коэффициент отражения для данного тела в процентах, то есть отношение светового потока, отраженного от образца, к световому потоку, падающему на него.

Красная шкала барабана соответствует оптической плотности образца. Обозначают ее через **D**.

Отсчет по барабанам производится при помощи визира 3.

В револьверном диске 5 установлены светофильтры № 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11, соответствующие длинам волн 400, 440, 490, 540, 582, 610, синий, зеленый, оранжевый, 665, 726 нм, 12-свободное отверстие.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Включают через трансформатор в сеть лампу осветителя. Путем поворота зеркала 11 направляют световой поток на диафрагмы прибора.

## УПРАЖНЕНИЕ I

### Измерение коэффициентов пропускания образцов

1. В правый пучок на предметный столик прибора помещают исследуемый образец. Устанавливают правый барабан на деление 100 (по черной шкале).
2. Вращая левый барабан, добиваются фотометрического равновесия.
3. После этого образец вынимают, и нарушенное положение фотометрического равновесия восстанавливают путем поворота правого барабана. Средний отсчет из нескольких, взятых по черной шкале правого барабана, дает коэффициент пропускания правого образца.
4. Вводят на пути световых пучков светофильтры № 1-11 и определяют коэффициент пропускания образца для различных длин волн.
5. Аналогичные измерения производят и для другого образца.
6. Строят графики зависимости коэффициентов пропускания  $t$  от длины волны  $\lambda$  и делают выводы.

## УПРАЖНЕНИЕ II

### Измерение коэффициентов отражения и яркости

1. На основание штатива вместо зеркала помещают приспособление для измерения блеска. Отсчет по лимбу Д устанавливают на нуль. В этом случае измерения будут проводиться в направлении нормали к образцу при освещении под углом  $45^\circ$ .
2. На держатель под правым барабаном кладут измеряемый образец, под левым – баритовую пластинку.

3. Устанавливают правый барабан на деление 89, равное коэффициенту яркости баритовой пластинки (89%) для белого света.
4. Поворотом левого барабана добиваются фотометрического равновесия.
5. Затем на место измеряемого образца кладут баритовую пластинку с тем же коэффициентом яркости, что и первая, и вращением правого барабана восстанавливают нарушение фотометрического равновесия. Отсчет по черной шкале даст коэффициент яркости измеряемого образца.
6. По формуле (20.4) вычисляют коэффициент отражения образца.
7. Измерения провести при введенных красном, синем, зеленом светофильтрах и сделать выводы.
8. Для одного из выбранных образцов проводят измерения коэффициента яркости при различных углах падения  $\alpha$  и строят график зависимости  $V=f(\alpha)$ .

### **УПРАЖНЕНИЕ III** **Измерение блеска**

При работе на фотометрах отношение коэффициентов яркости образца при углах  $\alpha$  и  $0^0$  можно связать с отсчётами по правому барабану прибора при углах  $\alpha$  и  $0^0$ .

Тогда формула (20.5) примет вид:

$$\gamma(\alpha) = \frac{100}{m(\alpha)} \frac{1}{P} \quad (20.7)$$

где 100 – отсчёт по правому барабану при угле  $0^0$ ;  $m(\alpha)$  - средний отсчёт по правому барабану при угле наклона образца  $\alpha$ .



1. В приспособление для измерения блеска вставляют держатель с баритовой пластинкой хвостовиком в соответствующее гнездо.
2. Правый барабан, под которым находится испытуемый образец, устанавливают на деление 100 по черной шкале.
3. Вращением левого барабана, под которым расположена баритовая пластинка, добиваются фотометрического равновесия. Это положение барабана при дальнейших измерениях остается неизменным.
4. Столик с образцом поворачивают на  $5^\circ$  в сторону осветителя и вращением правого барабана добиваются фотометрического равновесия. Фиксируют отсчет  $m$  (5) и по формуле (20.7) определяют коэффициент блеска  $\gamma$  (5). Соответствующую поправку  $P$  берут из таблицы.
5. Аналогичные измерения проводят при  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  и определяют соответствующие им коэффициенты блеска  $\gamma(\delta)$ .
6. Строят графики зависимости  $\gamma = f(\delta)$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под коэффициентами пропускания, отражения, поглощения света?
2. Как происходит уравнивание световых потоков в фотометре?
3. Что характеризуют коэффициенты яркости, блеска образца?
4. Чем обусловлен цвет тела?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №21

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА  
В РАСТВОРАХ

Цель работы: определение концентрации вещества в окрашенных растворах и проверка закона Бугера-Ламберта.

Приборы и принадлежности: фотометр электрический КФК-3, набор кювет, набор прозрачных окрашенных растворов (раствор медного купороса, раствор двуххромовокислого калия.)

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

При прохождении света через прозрачные растворы, газы он частично поглощается. Пусть на прозрачную среду падает свет интенсивности  $I_0$ . Интенсивность света  $I$ , прошедшего через раствор, согласно закону Бугера-Ламберта, определяется по формуле:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (21.1)$$

где  $\alpha$  – показатель поглощения, зависящий от свойств поглощающего вещества,  $d$  – толщина слоя.

Поглощение света веществом обусловлено взаимодействием световой волны с атомами и молекулами вещества. Под воздействием электрического поля световой волны  $\vec{E}$  электроны в атомах смещаются относительно ядер, совершая гармонические колебания. Возникают вторичные волны. Падающая волна интерферирует со вторичными волнами, испускаемыми электронами атомов и порождает волну с амплитудой, не равной амплитуде воздействующего электрического поля. С энергетической точки зрения это означает, что часть энергии электромагнитной волны идет на увеличение внутренней энергии вещества, через которое проходит свет. Электромагнитная волна переносит энергию, пропорциональную квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

Интенсивность  $I$  определяется как усредненное по времени наблюдения количество энергии, пересекающее единицу площади, перпендикулярной к направлению потока энергии, в единицу времени.

Интенсивность света, прошедшего через вещество, определяется законом Бугера-Ламберта и зависит как от толщины слоя, так и от природы и свойств поглощающего вещества.

Показатель поглощения света  $\alpha$  пропорционален молекулярной концентрации  $C$

$$\alpha = \alpha_0 C, \quad (21.2)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, не зависящий от концентрации и характерный для молекулы поглощающего вещества. Подставляя (21.2) в соотношение (21.1) получим:

$$I = I_0 e^{-\alpha_0 C d}. \quad (21.3)$$

Формула (21.3) носит название закона Бугера-Бера. Наблюдаются многочисленные отступления от него, особенно при значительном увеличении концентрации. Можно также обнаружить зависимость  $\alpha_0$  для растворенных веществ от природы растворителя, что также указывает на влияние окружающих молекул на поглощательную способность изучаемой молекулы.

Поглощение света прозрачными растворами исследуется при помощи фотометров различной конструкции. Измеряя интенсивности падающего и прошедшего света, можно определить концентрацию поглощающего вещества.

Для экспериментального исследования поглощения света в средах вводятся следующие характеристики:

1. Коэффициент пропускания

$$\tau = \frac{I}{I_0}, \quad (21.4)$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания,  $I_0$  – интенсивность падающего светового потока,  $I$  – интенсивность светового потока, прошедшего через раствор.

2. Оптическая плотность вещества

$$D = \lg \frac{I_0}{I}, \quad (21.5)$$

где  $D$  – оптическая плотность.

Связь между коэффициентом пропускания и оптической плотностью устанавливается с помощью формул (21.4) и (21.5)

$$D = \lg \frac{1}{\tau}. \quad (21.6)$$

Введение оптической плотности удобно при вычислениях, так как она меняется на несколько единиц, тогда как величина  $I / I_0$  может для различных образцов и на различных участках спектра изменяться на несколько порядков.

Коэффициент пропускания раствора  $\tau$  можно выразить из закона Бугера:

$$\tau = e^{-\alpha d}. \quad (21.7)$$

Отсюда определяется показатель поглощения, зависящий от свойств поглощающего вещества  $\alpha$  :

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \tau. \quad (21.8)$$

После соответствующих преобразований с учетом формул (21.4) и (21.5) зависимость между показателем поглощения  $\alpha$  и оптической плотностью раствора  $D$  определяется следующим образом:

$$\alpha = 2,3 \frac{D}{d}. \quad (21.9)$$

Для веществ, у которых атомы не взаимодействуют друг с другом, таких как газы, пары металлов при невысоком давлении, показатель поглощения  $\alpha$  для большинства частот (длин волн) близок к нулю. Резкие максимумы обнаруживаются для очень узких областей частот вблизи резонансных частот  $\omega_{0i}$  колебаний электронов в атомах. Качественно вид зависимости  $\alpha(\omega_0)$  для этого случая изображен на рис.21.1:

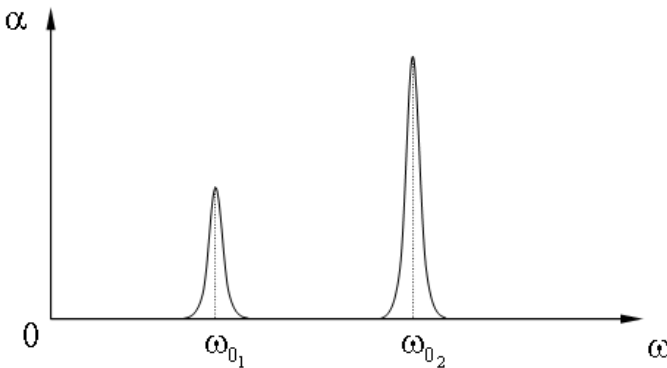


Рис. 21.1.

При увеличении взаимодействия между атомами, по мере повышения давления газов, спектральные линии поглощения уширяются. В твердых телах и жидкостях, где взаимодействие между атомами велико, наблюдаются широкие полосы поглощения. Качественный вид зависимости  $\alpha(\omega_0)$  для этого случая дает рис.21.2:

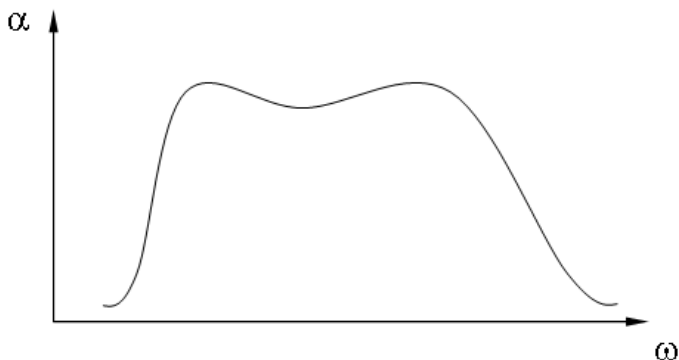


Рис. 21.2.

Для металлов показатель поглощения имеет порядок  $10^8 \text{ м}^{-1}$ . Это означает, что на расстоянии  $10^{-8} \text{ м}$  свет ослабляется в  $\epsilon=2,73\dots$  раз, т.е. металлы практически непрозрачны для света. Объясняется это наличием в металлах свободных электронов, которые под действием электрического поля световой волны начинают совершать упорядоченное движение. Если сопротивление металла мало, то электроны почти полностью переизлучают полученную от световой волны энергию (у серебра отражение достигает 99%). В металлах с худшей проводимостью доля отраженной энергии меньше, значительная часть энергии световой волны при этом переходит в джоулево тепло (у железа отражается 30-40% энергии падающей световой волны). При увеличении частоты света ситуация изменяется: тонкие слои металлов, совершенно непрозрачные для видимого света, становятся прозрачными для ультрафиолета.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Фотометр фотоэлектрический КФК-3 предназначен для измерения коэффициентов пропускания и оптической плотности прозрачных жидкостных растворов и твердых образцов. Он также

используется для измерения скорости изменения оптической плотности вещества и определения концентрации вещества в растворе.

Принцип действия фотометра основан на сравнении светового потока  $\Phi_0$ , прошедшего через растворитель, по отношению к которому проводится измерение, и светового потока  $\Phi$ , прошедшего через исследуемый раствор. Световые потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi$  фотоприемником преобразуются в электрические сигналы  $U_0$ ,  $U$  и  $U_T$  ( $U_T$  – сигнал при неосвещенном приемнике), которые обрабатываются микро-ЭВМ фотометра и представляются на цифровом табло в виде коэффициентов пропускания, оптической плотности, скорости изменения оптической плотности, концентрации.

Коэффициент пропускания  $\tau$  исследуемого раствора определяется как отношение электрических сигналов  $U - U_T$  прошедшего к  $U_0 - U_T$  падающего света

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} 100\% = \frac{I}{I_0} 100\% = \frac{U - U_T}{U_0 - U_T} 100\% \quad (21.11)$$

Оптическая плотность определяется следующим образом:

$$D = \lg \frac{1}{\tau} = \lg \frac{U_0 - U_T}{U - U_T} \quad (21.12)$$

Скорость изменения оптической плотности равна

$$A = \frac{D_2 - D_1}{t} \quad (21.13)$$

где  $D_2 - D_1$  – разность значений оптических плотностей за временной интервал  $t$  в минутах. Например,  $t$  принимает значения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 мин.

Концентрация  $C = DF$ , где  $F$  – коэффициент факторизации, который определяется экспериментально из графика и вводится цифровой клавиатурой в пределах от 0,001 до 9999.

Фотометр КФК-3 (рис. 21.3) состоит из корпуса 1, фотометрического блока 2, блока питания 3, кюветного отделения 4, микропроцессорной системы 5, монохроматора 6. Кюветное отделение закрывается съемной крышкой.

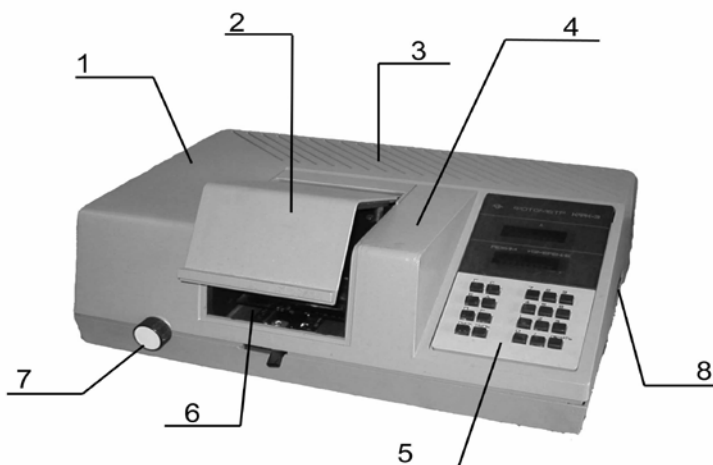


Рис. 21.3.

На боковой стороне фотометра расположена ось резистора "УСТ.0" и тумблер "сеть" 8.

В фотометрический блок входят: осветитель, монохроматор, кюветное отделение, кюветодержатель, фотометрическое устройство.

Монохроматор 6 служит для получения излучения заданного спектрального состава и состоит из корпуса, узла входной щели, сферического зеркала, дифракционной решетки, узла выходной щели и синусного механизма, находящегося внутри корпуса.

Ручка 7 служит для поворота дифракционной решетки через синусный механизм и установки длины волны в нм.

В фотометрическое устройство входят фотодиод и усилитель постоянного тока.

В кюветодержатель устанавливают кюветы с растворителем и исследуемым раствором и помещают их в кюветное отделение, при этом две маленькие пружины кюветодержателя должны находиться с передней стороны. Ввод в световой поток кювет осуществляется поворотом рукоятки 8 до упора влево или вправо. При установке рукоятки до упора влево в световой пучок вводится кювета с растворителем.

Микропроцессорная система 5 состоит из двух печатных плат, соединенных между собой разъемом. К фотометру система присоединяется через разъем. На переднюю панель фотометра выведена клавиатура и цифровое табло системы.

Микропроцессорная система обеспечивает выполнение семи задач:

НУЛЬ – измерение и учет сигнала при неосвещенном фотоприемнике, Г – градуировка фотометра, Е – измерение оптической плотности, П – измерение коэффициента пропускания, С – измерение концентрации, А – измерение скорости изменения оптической плотности, F – ввод коэффициента факторизации.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Подсоединить фотометр к сети 220В и включить тумблер 7 "сеть". Дать прогреться 30 мин. при открытой крышке кюветного отделения. Нажать клавишу "ПУСК" – на цифровом табло появится символ "Г", соответствующее ему значение и значение длины волны. Затем нажать клавишу "Ноль". На цифровом табло справа от мигающей запятой высвечивается значение  $n_0$ , слева – символ "0". Значение  $n_0$  должно быть не менее 0,005 и не более 0,200. Если  $n_0$  не укладывается в указанные пределы, то с помощью резистора «УСТ.0» добиваются нужного значения.

### УПРАЖНЕНИЕ I

#### Измерение зависимости коэффициентов пропускания и оптической плотности вещества от длины волны

1. В кюветное отделение установить кюветы с растворителем и исследуемым раствором медного купороса. Кювету с растворителем установить в дальнее гнездо кюветодержателя, а с исследуемым раствором – в ближнее гнездо кюветодержателя. Закрывать крышку кюветного отделения.
2. Путем поворота рукоятки 8 (рис. 21.3) влево до упора ввести в световой поток кювету с растворителем.
3. Нажать клавишу "Г" и маховичком 7 (рис. 21.3) установить длину волны 400 нм. Длина волны высвечивается на верхнем цифровом табло.
4. Нажать клавишу "П". Слева от мигающей запятой высвечивается символ "П", а справа – соответствующее значение "100±0,2", означающее, что начальный отсчет пропускания равен 100%.

Если отсчет "100±0,2" установился с большим отклонением, то нажать клавиши «Г» и «П» повторно через 3-5 с. Затем



необходимо открыть крышку кюветного отделения и нажать клавишу "НУЛЬ", закрыть крышку, нажать клавишу "П".

5. Рукояткой 8 ввести в световой пучок кювету с исследуемым раствором. По световому табло определить коэффициент пропускания раствора.
6. Путем нажатия клавиши "Г" установить маховичком 7 длины волн 450 нм, 500 нм, 550 нм, 600 нм, 650 нм, 700 нм, 750 нм и снять для них коэффициент пропускания  $\tau$ .  
Построить график зависимости коэффициента пропускания от длины волны т.е.  $\tau=f(\lambda)$
7. При длине волны 550 нм определить коэффициенты пропускания других растворов медного купороса.
8. Аналогичные измерения провести для раствора двуххромовокислого калия и построить график зависимости  $\tau=f(\lambda)$ .

### **Измерение оптической плотности вещества**

1. В кюветодержатель установить кюветы с растворителем и раствором и поместить их в кюветное отделение, закрыв крышку прибора.
2. Установить длину волны 400 нм по методике, описанной в предыдущем упражнении.
3. Нажать клавишу "Е" и по цифровому табло снять значения оптической плотности раствора.
4. Аналогичные измерения провести для длины волны 450 нм, 500 нм, 550 нм, 600 нм, 650 нм, 700 нм, 750 нм.
5. Построить график зависимости оптической плотности вещества от длины волны, т.е.  $D=f(\lambda)$ .
6. Провести аналогичные измерения для другого раствора.

## **УПРАЖНЕНИЕ II**

### **Исследование зависимости оптической плотности вещества от концентрации и определение неизвестной концентрации растворов**

1. В спектральной кривой зависимости  $D=f(\lambda)$  выбрать длину волны, для которой оптическая плотность мало зависит от  $\lambda$ , а ход кривой примерно параллелен горизонтальной оси. С помощью маховичка установить эту длину волны на табло фотометра.
2. Осуществить выбор кюветы. Для этого залить раствор средней

концентрации в кюветы различной длины и определить для них оптическую плотность вещества по методике, описанной в упражнении 2. Для дальнейшей работы использовать кювету, для которой оптическая плотность вещества находится в пределах от 0,3 до 0,6.

3. В выбранную кювету залить ряд растворов медного купороса с известной концентрацией и определить для них оптическую плотность  $D$ .
4. Построить график зависимости оптической плотности  $D$  от концентрации медного купороса  $C$ , т.е.  $D=f(C)$ .
5. Аналогичные измерения провести для растворов двуххромовокислого калия.
6. Убедиться в линейной зависимости оптической плотности веществ от концентрации  $C$ , т.е. зависимость на графике должна иметь вид прямой линии.

#### **Определение неизвестной концентрации растворов**

1. По графику зависимости  $D=f(C)$  для средней его части рассчитать коэффициент факторизации по формуле:

$$F = \frac{C}{D}.$$

(факторизация – разложение выражений; главная цель факторизации это нахождение максимального числа независимых множителей выражения, линейных по заданным переменным с коэффициентами наиболее простой формы.)

2. Ввести в память вычислительного блока коэффициент " $F$ ". Для этого нажать клавишу « $F$ » и с помощью цифровой клавиатуры набрать вычисленное значение  $F$ . Фотометр для измерения концентрации подготовлен к работе.
3. Налить в прежнюю кювету раствор неизвестной концентрации, поместить в кюветное отделение прибора. Закрыть крышку.
5. Нажать клавишу « $C$ » и справа от мигающей запятой снять отчет неизвестной концентрации.
6. Аналогичные измерения выполнить для других растворов неизвестной концентрации, а также для неизвестных растворов двуххромовокислого калия, введя для них свой коэффициент « $F$ ».

### УПРАЖНЕНИЕ III

#### Определение скорости изменения оптической плотности раствора

1. В кюветодержатель поместить вместо кюветы с раствором кювету, в которой налита дистиллированная вода и введено несколько кристаллов медного купороса или марганцовки.
2. Нажать клавишу "А" и с помощью цифровой клавиатуры ввести в память время  $t$ , через которое необходимо определить скорость изменения оптической плотности "А". Время взять последовательно равным 1 мин, 2 мин, 3 мин, 4 мин, 5 мин, 6 мин, 7 мин, 8 мин, 9 мин.
3. По истечении времени  $t$  на цифровом табло высвечивается скорость изменения оптической плотности вещества.
4. Построить график зависимости "А" изменения оптической плотности от времени  $t$ , т.е.  $A=f(t)$ .

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими величинами характеризуется поглощение света растворами?
2. Как формулируется закон Бутера-Ламберта?
3. Что такое оптическая плотность вещества?
4. Как связан показатель поглощения с коэффициентом пропускания?
5. Как определяется неизвестная концентрация раствора в работе?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г.С. Оптика, Москва, Наука, 1976, 926 с.
2. Матвеев А.Н. Оптика, Москва, Высшая школа, 1985, 351 с.
3. Саржевский А.М. Оптика.Т.1. Минск, Университетское, 1984.
4. Саржевский А.М. Оптика.Т.2. Минск, Университетское, 1986.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Москва, Наука, 1978.
6. Савельев И.В. Курс общей физики, Москва, Наука, Т.3, 1982, 302 с..
7. Годжаев Н.М. Оптика. Высшая школа, 1977.
8. Калигиевский М.И. Волновая оптика, Наука, Москва, 1971.
9. Крауфорд Ф. Волны.-М.:Наука, 1984.-351с.
10. Ахманов С.А., Никитин С.Ю.. Физическая оптика, Москва, Изд-во МГУ; Наука, 2004, 656 с.
11. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.И.. Оптика и атомная физика, Москва, Академия, 2002, 408 с.
12. Бутиков Е. И. Оптика. С-Петербург, Невский диалект, 2003, 480 с.
13. Трофимова Т.И. Оптика и атомная физика: законы, проблемы, задачи. Москва, Высшая школа, 1999, 288с.
14. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Том 2. Колебания и волны. Квантовая физика, физика ядра и элементарных частиц., Москва, Изд-во физико-математической литературы, 2003, 552 с.
15. Бондарев Б. В., Калашников Н. П., Спирин Г. Г. Курс общей физики. Книга 2. Электромагнетизм. Волновая оптика. Квантовая физика, Москва, Высшая школа, 2003, 438 с.
16. Физический практикум, под ред. Г.С. Кембровского, Минск, Университетское, 1986, 352 с.
17. Лабораторный практикум по физике, под ред. А.С.Ахматова, Москва, Высшая школа, 1980, 360 с.

18. Физический практикум. Электричество и оптика, под ред. В.И.Ивероной, Москва, Наука, 1968, 816 с.
19. Практикум по общей физике, под ред. Ноздрева В.Ф., Москва, Просвещение, 1971, 311 с.
20. Физический энциклопедический словарь, Москва, Советская энциклопедия, 1983, 928 с.
21. Емельянов В.А., Лин Д.Г., Шолох В.Ф. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума, Минск, Бестпринт, 1997,90 с.
22. Маскевич А.А. Физический практикум по оптике, Гродно, ГрГУ, 2001, 251 с.
23. Методика преподавания физики, под ред. Орехова В.П. и Усовой А.В. Москва, Просвещение, 1976.
24. Стрижнев В.С., Семченко И.В., Амирова Н.Я. Лабораторные работы по оптике для студентов физических специальностей университетов. Часть I. Волновая оптика - Гомель, 1987, 44 с.
25. Стрижнев В.С., Семченко И.В., Амирова Н.Я. Лабораторные работы по оптике для студентов физических специальностей университетов. Часть II. Геометрическая и квантовая оптика - Гомель, 1987, 40 с.
26. Стрижнев В.С., Хахомов С.А. Лабораторные работы по оптике для студентов физических специальностей университетов. Часть III. Геометрическая, волновая и квантовая оптика - Гомель, 2001, 100 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Погрешности в лабораторном практикуме по оптике.....	5
1. Изучение основных законов фотометрии.....	23
2. Определение фокусных расстояний линз по методу Бесселя и с помощью коллимационной трубы .....	29
3. Изучение основных характеристик микроскопа .....	40
4. Измерение показателей преломления стекла микроскопом и жидких и твердых тел рефрактометром .....	46
5. Изучение поляризации света .....	64
6. Изучение явления вращения плоскости поляризации .....	75
7. Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля .....	80
8. Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона и оптического сферометра .....	85
9. Изучение чистоты обработки поверхности с помощью микроинтерферометра Линника.....	92
10. Определение показателей преломления жидкостей и газов с помощью интерферометра ИТР-2 и Жамена .....	100
11. Изучение дифракции Фраунгофера при помощи газового лазера .....	109
12. Изучение дифракции света Фраунгофера и осуществление пространственной фильтрации изображения .....	117
13. Определение дисперсии и разрешающей способности дифракционного стилоскопа СЛ-13 .....	131
14. Определение дисперсии и разрешающей способности стилоскопа СЛ-11А .....	139
15. Измерение дисперсии и показателя преломления стеклянной призмы .....	146
16. Изучение законов теплового излучения .....	154

17. Определение постоянных Планка и Ридберга с использованием монохроматора УМ-2.....	169
18. Исследование фотоэлемента .....	179
19. Изучение основных закономерностей внутреннего фотоэффекта .....	190
20. Измерение коэффициентов светопропускания, отражения, яркости и блеска различных материалов.....	202
21. Исследование поглощения света в растворах .....	210
Литература.....	220

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

Учебное издание

**СЕМЧЕНКО Игорь Валентинович**  
**ХАХОМОВ Сергей Анатольевич**

**Лабораторный практикум по оптике**

Редактор *С. А. Хахомов*

Компьютерная верстка и дизайн *С. А. Хахомова*

Лицензия №02330/0133208 от 30.04.2004.

Подписано в печать 22.12.2006 г. Формат 60 x 84 1/16

Бумага писчая №1. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная.

Усл. п. л. 14,0. Уч.-изд. л. 13,2. Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано с оригинала-макета на ризографе учреждения образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска  
Скорины»,

ЛП № 02330/0056611 от 16.02.2004

246019, г. Гомель, ул. Советская 104.