

ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие содержит описание лабораторных работ по физике, выполняемых в Златоустовском филиале ЮУрГУ студентами инженерных специальностей в третьем семестре изучения курса общей физики. На выполнение каждой работы отводится два академических часа. К лабораторным занятиям студенты, как и ранее, готовятся в часы их самостоятельной работы. При подготовке особое внимание должно быть обращено на ясное понимание физических закономерностей, на которых основано определение искомых величин, работа приборов и т.п. Не меньшую важность представляет и усвоение основных определений, характеристик приборов, единиц измерения, методики проведения измерений и обработки их результатов.

Для облегчения подготовки к занятиям и самоконтроля в конце описания каждой работы имеются контрольные вопросы, на которые студент должен ответить, прежде чем будет допущен к выполнению измерений. Ответы на поставленные вопросы можно найти в рекомендованной литературе, а также в данном пособии. В Приложениях I – V приведены основные справочные данные, необходимые для выполнения лабораторных работ. Отчёт по выполненной работе делается по форме, известной из первой части практикума по физике.

Напоминаем принятый в нашем лабораторном практикуме упрощённый способ обработки результатов измерений. Нахождение *среднего значения* и определение *абсолютной* и *относительной* погрешностей сводится к заполнению известной из первой части физпрактикума табл. 1.

Таблица 1

| № п.п. | Результаты измерений X_i | Отклонение от среднего ΔX_i | |
|--|-------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| | | - | + |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| .. | | | |
| Среднее значение: $\langle X \rangle = \dots$ | | Сумма " + " | Сумма " - " |
| Средняя абсолютная погрешность: $\langle \Delta X \rangle = \dots$ | | | |
| Результат измерений: $X = \langle X \rangle \pm \langle \Delta X \rangle$ | | | |
| Относительная погрешность: $\varepsilon = (\langle \Delta X \rangle / \langle X \rangle) \cdot 100 \%$ | | | |

После обработки результатов измерений и оформления отчета по усмотрению преподавателя проводится защита проделанной работы (как правило, на следующем занятии, перед опросом по очередной лабораторной работе).

Практикум 3 семестра отличается тем, что обычно начинается в начале семестра, и для получения допуска к измерениям студенту необходимо не только изучить теорию метода и описание лабораторной установки по этому пособию, но и самостоятельно проработать теоретический материал по известным учебникам и справочникам [1–5].

Как и в лаборатории электричества и магнетизма, для выполнения измерений в лаборатории оптики потребуются навыки работы с электрическими схемами и

приборами. *Напоминаем*: во избежание порчи приборов и других неприятностей, сразу после сборки схемы (до подачи на неё напряжения!) её необходимо показать для проверки руководителю работ. По окончании измерений схему нужно разобрать, и навести порядок на своем рабочем месте.

Приступая к выполнению работы, следует, прежде всего, ознакомиться с особенностями приборов: определить предельные значения измеряемых величин, цену деления и абсолютную погрешность прибора. Напоминаем, что погрешность стрелочных измерительных приборов определяется *классом точности*, который указывается на шкале прибора. Например, амперметр класса точности **1,0** с пределом измерения **5 А** имеет абсолютную погрешность **0,05 А** ($\Delta I = 5 \cdot 1,0/100$). Обычно цена деления шкалы прибора приблизительно равна его абсолютной погрешности, поэтому, как и в случае с линейкой, можно определять абсолютную погрешность прибора по наименьшей цене деления шкалы.

Работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СТЕКЛА ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

Цель работы: ознакомиться с явлением дисперсии света, рассчитать показатели преломления для лучей различного цвета по измеренным расстояниям от линзы до изображения, определить зависимость показателя преломления стекла от длины световой волны.

Оборудование: блок питания лампы, оптическая скамья и установленные на ней: источник света, набор светофильтров, предмет (слайд), линза, экран.

Краткая теория

Для выполнения этой лабораторной работы потребуется применение законов геометрической оптики. В основе геометрической оптики лежит представление о прямолинейном распространении света в однородной среде. *Лучом света* называют ту линию, вдоль которой распространяется свет, испущенный источником. В однородной среде эта линия – прямая. При плавном изменении оптических свойств среды, в которой распространяется свет, ход луча искривляется.

На границе раздела двух прозрачных сред свет частично отражается от границы, и частично переходит во вторую среду, и в новой среде распространяется уже с другой скоростью, величина которой зависит от оптических свойств среды.

Оптические свойства среды принято характеризовать *абсолютным показателем преломления* n . Его величина равна отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1.1)$$

Из определения видно, что показатель преломления для вакуума равен единице. Для всех остальных сред он больше единицы, поскольку скорость света в пустоте больше его скорости в любой среде.

В зависимости от значения показателя преломления прозрачные среды делят на оптически более плотные и менее плотные. Чем больше показатель преломления, тем больше *оптическая плотность*. Изменение скорости световой волны при переходе в другую среду вызывает изменение направления луча – *преломление света*. Чем больше показатель преломления среды, тем сильнее изменяется направление светового луча (рис. 1.1). Связь между углом падения и углом преломления называется *законом преломления света*:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.2)$$

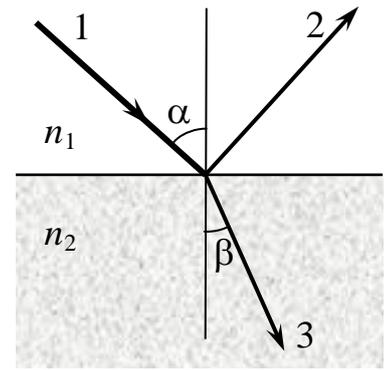


Рис. 1.1

В вакууме световые волны любой частоты распространяются с одинаковой скоростью. Однако в материальной среде скорость света зависит не только от оптической плотности среды, но и от длины волны. Зависимость показателя преломления от длины волны называется *дисперсией показателя преломления*. Поскольку излучение с определённой длиной волны вызывает зрительное ощущение определённого цвета, то с некоторой натяжкой можно говорить о зависимости скорости света в среде, а значит и показателя преломления, от *цвета* луча. Установлено, что в оптическом диапазоне (длины волн от 400 до 800 нм) с увеличением длины волны показатель преломления уменьшается. Проверка этого утверждения и составляет суть данной лабораторной работы.

Закон преломления света лежит в основе получения изображений с помощью линз. Вспомним некоторые определения, формулы и правила построения изображений в линзе.

Линза – это прозрачное тело с показателем преломления $n > 1$, ограниченное сферическими поверхностями. На рис. 1.2, а дано схематическое изображение двояковыпуклой линзы; R_1, R_2 – радиусы, C_1, C_2 – центры сферических поверхностей.

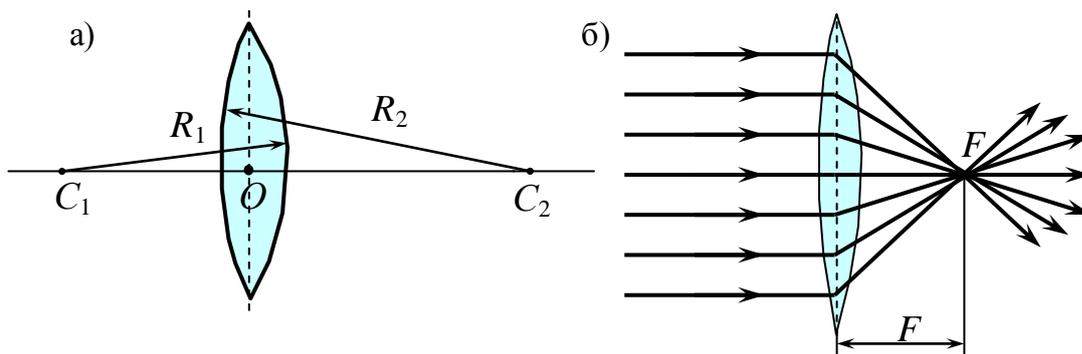


Рис. 1.2

Линза называется *тонкой*, если её толщина значительно меньше радиусов кривизны её поверхностей. Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, называется *главной оптической осью линзы*. Точка тонкой линзы, через которую все лучи проходят, не изменяя своего направления, называют *опти-*

ческим центром линзы (т. O на рис. 1.2, а). Перпендикулярная главной оптической оси плоскость, в которой лежит центр линзы, называется *плоскостью линзы*.

Собирающая линза (середина линзы толще её краёв) будет преломлять лучи, параллельные её главной оси C_1C_2 так, что они все пройдут через одну точку F , которая называется *фокусом* линзы (рис. 1.2, б). Расстояние F между фокусом и центром линзы называют *фокусным расстоянием*.

Оптической силой D линзы называется величина, обратная фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}. \quad (1.3)$$

Измеряется оптическая сила в *диоптриях* (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м. У линзы с фокусным расстоянием 20 см оптическая сила будет 5 дптр (в воздухе). У рассеивающих линз $D < 0$.

Оптическая сила линзы зависит от радиусов R_1 и R_2 сферических поверхностей и от разности $(n - n_0)$ показателей преломления материала линзы и окружающей её среды. Так как показатель преломления воздуха практически равен единице ($n_0 = 1,000292$ при атмосферном давлении), то оптическая сила двояковыпуклой линзы с достаточной точностью может быть определена по формуле:

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (1.4)$$

Зная радиусы кривизны линзы, и определив на опыте оптическую силу для трёх основных цветов, можно для каждого из них рассчитать показатель преломления. Для определения оптической силы вы будете пользоваться *формулой тонкой линзы*, которую мы приведём ниже. Для того, чтобы пояснить эту формулу, обратимся к рис. 1.3, на котором построено изображение предмета h , который находится между фокусом и двойным фокусом на расстоянии d от линзы. Это расстояние больше фокусного расстояния F , которое отложено по обе стороны от линзы.

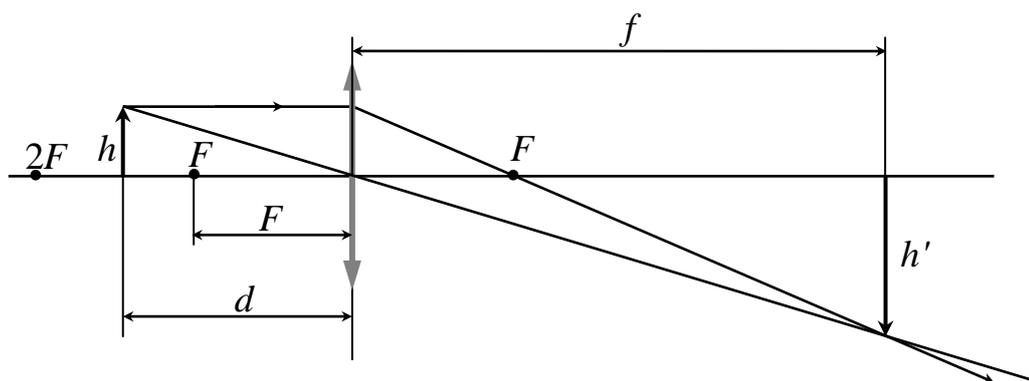


Рис. 1.3

Для построения изображения из верхней точки предмета проведены два луча. Один проходит через оптический центр линзы, не преломляясь, второй проведён параллельно оптической оси линзы и, меняя своё направление, проходит через задний фокус. Пересечение этих двух лучей произойдёт в точке, которая и будет

изображением верхней точки предмета. Опустив на ось перпендикуляр, получим изображение предмета, которое находится на расстоянии f от линзы. Как видно из рисунка, изображение будет действительным, увеличенным и перевернутым. Измерив расстояния d и f , можно вычислить оптическую силу по известной формуле тонкой линзы:

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1.5)$$

а затем из формулы (1.4) выразить показатель преломления и вычислить его значение. Поскольку показатель преломления зависит от цвета, то изображения, полученные при освещении предмета разными цветами, будут находиться на разных расстояниях от линзы. Подумайте, в каком цвете изображение получится на наибольшем расстоянии от линзы!

Описание установки

Установка для наблюдения дисперсии света изображена на рис 1.4. Она смонтирована на оптической скамье, в основании которой укреплена линейка с миллиметровыми делениями.

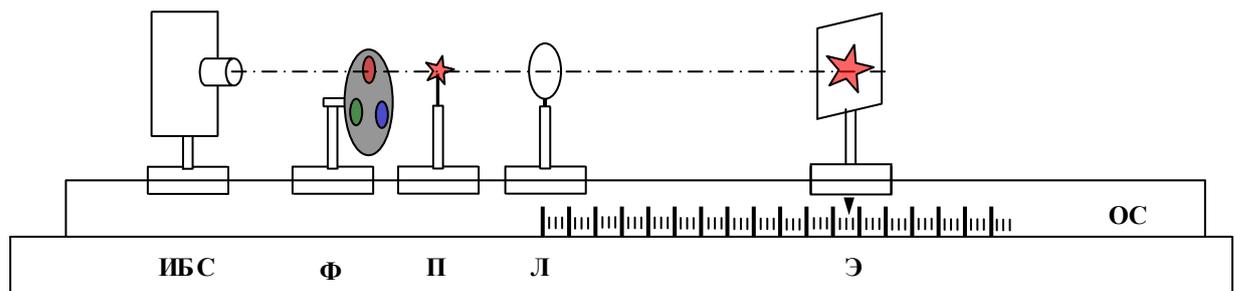


Рис. 1.4. ИБС – источник белого света; Ф – светофильтры; П – предмет; Л – линза; Э – полупрозрачный экран; ОС – оптическая скамья

Свет от лампы – источника *белого* света – проходит через один из трёх светофильтров, укрепленных на поворотной обойме Ф. На каждом светофильтре указана длина волны, которую пропускает светофильтр. Свет, теперь уже определенной длины волны, освещает рисунок, который нанесён на стеклянную пластинку П. Линза Л расположена от предмета на расстоянии d , которое больше фокусного расстояния, т. е. реализован случай, для которого выше выполнено построение изображения (см. рис. 1.3). Все перечисленные предметы закреплены на скамье, и менять между ними расстояние не нужно (за исключением расстояния до экрана).

Резкое изображение рисунка нужно получить на полупрозрачном экране в проходящем свете. Изображение будет резким, только когда расстояние от линзы до экрана будет в точности равно f . Ваша задача состоит в том, чтобы найти на опыте и измерить это расстояние. Для этого следует перемещать экран до тех пор, пока изображение не станет максимально чётким.

Из-за дисперсии оптическая сила линзы, и, следовательно, фокусное расстояние, для лучей разного цвета будет различной, и изображение одного и того же предмета в разных цветах будет получаться на разных расстояниях f от линзы. Вам предстоит в этом убедиться, получив изображения предмета последовательно в красном, зелёном и синем свете. Приступая к работе, Вы должны знать, как построить изображение предмета, при каком светофильтре расстояние до изображения будет минимальным.

Выполнение измерений

1. Осмотрите лабораторную установку, определите расположение её элементов (см. перечень в разделе «Оборудование»).
2. Запишите в табл. 1.1 три цвета, соответствующие им длины волн светофильтров и указанные на оправе линзы значения радиусов сферических поверхностей.
3. Измерьте расстояние d между предметом и линзой, запишите в табл. 1.1.
4. С разрешения руководителя работ включите источник света.
5. Установите в рабочее положение *красный* светофильтр и отрегулируйте высоту предмета так, чтобы весь слайд освещался пучком света.
6. Перемещая экран вдоль оптической скамьи, и глядя на него со стороны, противоположной источнику света (на просвет), подберите такое положение экрана, при котором получается самое чёткое изображение предмета.
7. По линейке на оптической скамье измерьте расстояние f с точностью до миллиметров, и запишите его в соответствующую клеточку таблицы.
8. Прделайте такие же измерения с зелёным светофильтром, а затем с синим, измеряя и записывая в таблицу соответствующие расстояния f для этих цветов.
9. Повторите измерения по пп. 5–8 ещё 2 раза. Все измерения проводите тщательно, добиваясь резкого изображения и точного отсчёта по миллиметровой линейке. В результате получится по 3 значения расстояния f для каждого цвета.
10. Отключите электропитание, покажите результаты измерений преподавателю. Получив у него подтверждающую подпись, наведите порядок на своём рабочем месте.

Таблица 1.1

| $R_1 = \dots$ мм | | | | $R_2 = \dots$ мм | | | |
|------------------|---------|----------------|----------|------------------|--------------------------|------------|-----|
| № п/п | Цвет | λ , нм | d , мм | f , мм | $\langle f \rangle$, мм | D , дптр | n |
| 1 | Красный | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | Зелёный | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | Синий | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |

Анализ и обработка результатов измерений

Заполните три последних колонки табл. 1.1. Для этого:

- 1) вычислите средние значения расстояний $\langle f \rangle$ для каждого цвета;
- 2) по формуле (1.5) найдите среднее значение оптической силы исследуемой линзы для каждого цвета, подставляя в формулу соответствующие *средние значения* $\langle f \rangle$ в единицах СИ.
- 3) выразите из формулы (1.4) и вычислите показатель преломления для каждого цвета. Полученные значения заносите в соответствующие ячейки таблицы. **ВНИМАНИЕ! Все расчёты выполняйте с 3-мя знаками после запятой.**
- 4) постройте график зависимости показателя преломления от длины волны;
- 5) проанализируйте полученные результаты, сформулируйте и запишите выводы. Для какого цвета показатель преломления минимален? Максимален? Поясните, на основании чего Вами сделан вывод;
- 6) вычислите фокусное расстояние линзы и к отчёту приложите рисунок, где в масштабе покажите ход параллельных лучей белого цвета через линзу. Из прошедших линзу лучей следует показать только лучи двух цветов (по указанию преподавателя). Выполните их в цвете.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. Что называется абсолютным показателем преломления? От чего зависит его величина? Для какого цвета показатель преломления имеет наибольшее значение?
4. Что называют дисперсией света? Дисперсией показателя преломления?
5. Дайте определение оптической силы линзы и фокусного расстояния. Для лучей какого цвета фокусное расстояние максимально? Минимально?
6. Выполните построение изображения в линзе для любого соотношения между d и F ($d > 2F$; $F < d < 2F$; $d < F$).
7. Запишите формулу тонкой линзы.
8. Получите из формулы (1.4) расчётную формулу для вычисления показателя преломления.

Работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Цель работы: ознакомиться с особенностями лазерного излучения, определить постоянную дифракционной решётки и длины световых волн основных цветов.

Оборудование: оптическая скамья с источником света, дифракционная решётка, лазер, экран со щелью.

Краткая теория

В данной работе вы будете изучать такое явление, как дифракция. Первоначально понятие дифракции относилось только к огибанию волнами препятствий, но в современном, более широком толковании, с *дифракцией* связывают весьма широкий круг явлений, возникающих при распространении волн в неоднородных средах, а также при распространении ограниченных в пространстве волн. Дифракция тесно связана с явлением интерференции. Более того, само явление дифракции зачастую трактуют как частный случай интерференции (интерференция вторичных волн).

Наиболее сильно дифракционные эффекты проявляются при размерах неоднородностей, сравнимых с длиной волны. При размерах неоднородностей, существенно превышающих длину волны (на 3–4 порядка и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь.

Наблюдение дифракции осуществляется обычно по следующей схеме. На пути световой волны, распространяющейся от некоторого источника, помещается непрозрачная преграда, закрывающая часть волновой поверхности световой волны. За преградой располагается экран, на котором возникает дифракционная картина.

Дифракцию в данной работе вы будете наблюдать с помощью *дифракционной решётки* – прибора, представляющего собой ряд прозрачных щелей одинаковой ширины, разделенных одинаковыми непрозрачными промежутками. Сумма длин прозрачных и непрозрачных промежутков называется *периодом решётки*.

При падении плоской световой волны на дифракционную решётку, согласно принципу Гюйгенса – Френеля, щели дифракционной решётки будут излучать вторичные цилиндрические волны, которые являются когерентными.

Напоминаем, что когерентными называются волны одинаковой частоты и с постоянной разностью фаз. В результате наложения когерентных волн наблюдается явление интерференции, т. е. усиление или ослабление интенсивности света в разных точках пространства. Если оптическая разность хода двух волн Δ равна целому числу длин волн, то в точке наложения лучей будет наблюдаться максимум:

$$\Delta = \pm k\lambda, \quad (2.1)$$

где k – целое число, называемое *порядком интерференции*; λ – длина волны.

На рис. 2.1, а показан ход лучей через дифракционную решётку. За щелями в результате дифракции лучи будут распространяться в различных направлениях. Рассмотрим те из них, которые отклонились на угол α . В точке A экрана они дадут интерференцию. Нетрудно выделить и точку A' , для которой угол дифракции будет аналогичен. Поэтому наблюдаемый максимум будет иметь ширину $A'A$ тем меньшую, чем меньше ширина пучка света, упавшего на решётку.

На рис. 2.1, б показаны два луча, идущие от двух соседних щелей, которые, пройдя через решетку, отклонились на один и тот же угол. Поместим за решёткой собирающую линзу, а в фокальной плоскости линзы – экран. Линза соберёт эти лучи в точке A экрана. Результат наложения зависит от разности хода Δ , которую

они приобрели из-за отклонения от прямого пути. Как следует из рисунка, разность хода лучей, отклонившихся на угол α , будет пропорциональна синусу угла отклонения:

$$\Delta = d \sin \alpha. \quad (2.2)$$

Ширина щелей и промежутков между ними должны быть соразмерны длине волны, иначе дифракция наблюдаться не будет. Это условие очевидно: при $d \gg \lambda \sin \alpha$ и, следовательно, угол α в (2.2) будут стремиться к нулю, и дифракционные максимумы и минимумы будут накладываться друг на друга, создавая равномерную освещённость вместо чередования максимумов и минимумов. В используемой нами решётке период составляет около 3–4 мкм и более точно он может быть определён по известной длине волны излучения лазера.

Из выражений (2.1) и (2.2) легко получить условие главных дифракционных максимумов – *формулу дифракционной решётки*

$$d \sin \alpha = \pm k \lambda. \quad (2.3)$$

Из формулы (2.3) видно, что если падающий свет содержит несколько различных длин волн, то волны с разной длиной волны отклонятся на различные углы (рис. 2.1, в). Т. е. решётка разложит такой свет в спектр. Понятно, что в разных точках экрана встречаются лучи, отклонённые на разные углы. В середине экрана происходит наложение неотклонённых лучей, для которых разность хода $\Delta = 0$ независимо от длины волны, поэтому при освещении решётки белым светом в центре наблюдается *белый* максимум нулевого порядка – проекция щели. Положение остальных максимумов зависит от длины волны, в результате чего образуется спектр. Воспользовавшись равенством (2.3), нетрудно сообразить, в каком порядке по отношению к центральному пятну расположатся цвета дифракционного спектра. Максимумы разделены минимумами: при наложении когерентные лучи могут не только усиливать, но и гасить друг друга.

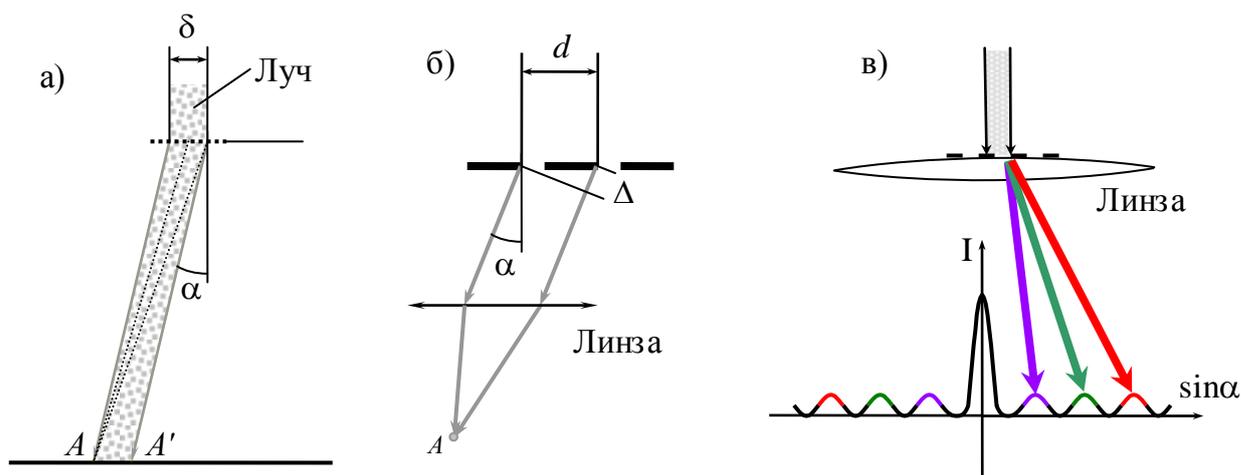


Рис. 2.1

Равенство (2.3) может быть использовано для экспериментального определения длины волны. Для этого нужно определить среднее значение $\sin \alpha$ для максимума соответствующего цвета и период дифракционной решетки d . При определении периода решетки вы познакомитесь с работой полупроводникового лазера.

ра непрерывного действия. Его излучение имеет вишнёвый цвет и строго постоянную длину волны $\lambda_{\text{л}} = 650 \text{ нм}$.

Существующие ныне лазерные установки разнообразны по конструкции и их использованию. Наиболее мощное излучение можно получить от твердотельных лазеров, потому что в них высока концентрация излучающих атомов. Газовые лазеры пригодны для работы в лабораториях, хотя мощность их невелика. Особенностью лазера является то, что его излучение когерентное. Эта когерентность обуславливает те признаки, которые отличают лазерный луч от обыкновенного: *острая направленность* (очень малая расходимость луча), и связанная с этим *высокая плотность энергии* луча.

Так как длина волны лазерного излучения известна с большой точностью, то по углу отклонения лазерного луча на дифракционной решётке можно определить её постоянную d .

Описание установки

Схема установки изображена на рис. 2.2. На оптической скамье расположены: осветитель (лампа или лазер), линейка со щелью и дифракционная решётка. Щель вырезает из пучка белого света узкую полосу. Свет, проходя через решётку, вследствие дифракции отклоняется на разные углы. Роль линзы (см. рис. 2.1, б) в данной установке играет хрусталик глаза. Хрусталик соберёт лучи, отклонённые на один и тот же угол (на рис. 2.2 они обозначены сплошной линией), и глаз спроецирует изображение спектра на линейку, на шкале которой и наблюдаются изображения максимумов. Проецируемые глазом лучи обозначены пунктирными линиями.

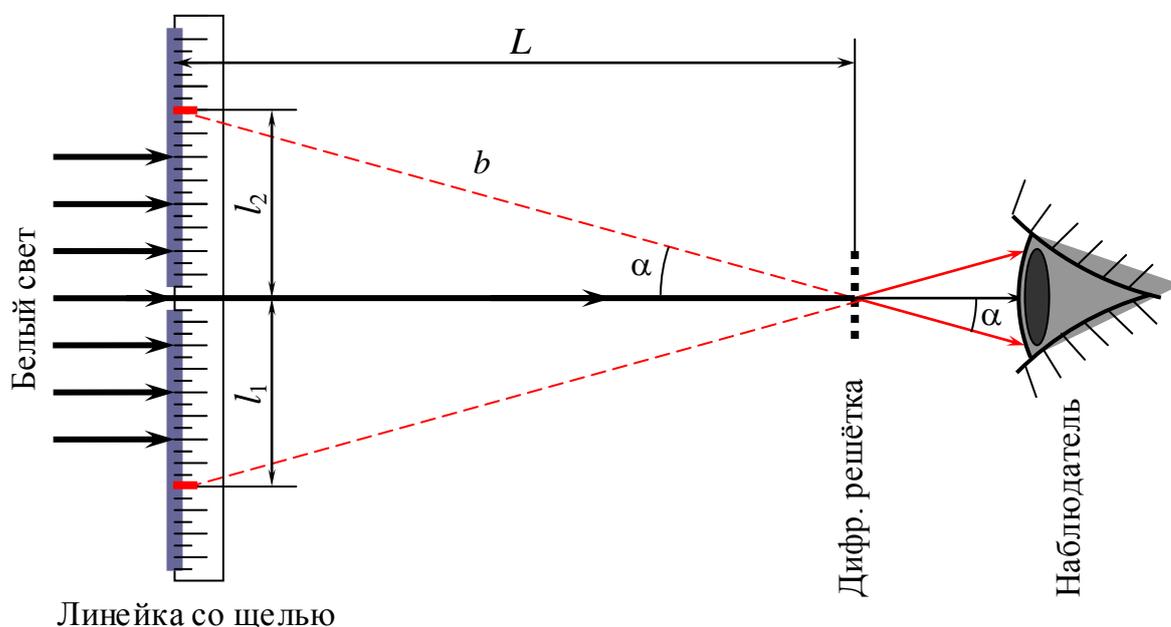


Рис. 2.2

Изучив рис. 2.2, убедитесь, что среднее для любого максимума значение $\sin \alpha$ нетрудно определить, зная гипотенузу b прямоугольного треугольника и среднее

значение отклонения $\langle l \rangle$ луча для конкретного цвета. Две шкалы позволяют найти расстояния L , l_1 и l_2 для каждого максимума.

Получите формулы для определения $\sin \alpha$, периода решётки и длины волны.

Выполнение измерений

Задание 1. Определение периода дифракционной решётки

Внимание! Меры предосторожности:

Не направляйте лазерное излучение в глаза! Прямое попадание в глаза лазерного излучения опасно для зрения!

С разрешения руководителя работ включите лазер и установите экран и решётку так, чтобы картина на экране была наиболее чёткой.

Произведите замеры расстояний l_1 , l_2 и L в соответствии с подробной инструкцией, имеющейся на рабочем месте. Результаты запишите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

| № п.п. | k | L , | l_1 , | l_2 , | $\langle l \rangle$, | $\sin \alpha$ | d , |
|--------|-----|-------|---------|---------|-----------------------|---------------|-------|
| 1 | 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 | 2 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 3 | 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 4 | 2 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Задание 2. Определение длин волн некоторых цветов спектра

В этом задании источником света является лампа накаливания. Система линз служит для получения узкого пучка света, достаточно сильного для наблюдения дифракции.

Измерения в задании 2 также проводятся в соответствии с инструкцией на рабочем месте. Результаты измерений занесите в табл. 2.2. Следует определить расстояния l_1 и l_2 для каждого цвета четыре раза: при двух значениях k и двух разных расстояниях L , **либо** при четырех расстояниях L и одном значении $k = 1$, **если** максимумы второго порядка наблюдаются нечётко.

Таблица 2.2

| № п.п. | Цвет | k | L , | l_1 , | l_2 , | $\langle l \rangle$, | $\sin \alpha$ | λ , |
|--------|------------|-----|-------|---------|---------|-----------------------|---------------|-------------|
| | Красный | | | | | | | |
| | Зеленый | | | | | | | |
| | Фиолетовый | | | | | | | |
| | Красный | | | | | | | |
| | Зеленый | | | | | | | |
| | Фиолетовый | | | | | | | |

Анализ и обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2.1 найдите 4 значения периода решётки, его среднее значение и погрешности. Опишите в отчёте наблюдаемый спектр, дайте объяснение тому, что максимумы имеют столь существенную ширину.

2. Заполните полностью табл. 2.2. Для расчёта длин волн используйте значение постоянной решётки d , взятое из Задания 1. Опишите в отчёте наблюдаемую Вами картину. Составьте таблицы обработки для каждого цвета и запишите конечный результат по общим правилам.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. В чём заключается явление дифракции?
4. Что представляет собой дифракционная решётка и каковы её основные параметры?
5. Выведите формулу дифракционной решётки (2.3).
6. В каком порядке от центрального максимума располагаются цвета дифракционных максимумов?
7. В каком интервале длин волн лежит видимый свет?
8. Выведите и запишите расчётные формулы для определения длин волн видимого света и периода дифракционной решётки.
9. Как зависит угол отклонения дифракционного максимума от длины волны? От периода решётки?
10. Чем отличаются установки по наблюдению дифракции обычного света и лазерного луча?
11. Дайте определение длины волны. Как она связана с частотой света?
12. В чём отличие лазерного излучения от естественного света?

Работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: Снять вольтамперную характеристику фотоэлемента. Экспериментально определить постоянную Планка и граничную частоту фотоэффекта для данного фотоэлемента. Объяснить наблюдаемые закономерности, уточнив, какие из них объясняются только квантовыми представлениями о свете, а какие могут быть поняты и на основе классических волновых представлений.

Оборудование: лампа накаливания, фотоэлемент, набор оптических фильтров, оптическая скамья, блок питания с встроенными микроамперметром и вольтметром.

Краткая теория

Внешним фотоэффектом или *фотоэлектронной эмиссией* называется явление выхода электронов из металла под действием света.

В фотоэффекте проявляется квантовая теория света. Объяснить закономерности фотоэффекта, используя волновую точку зрения на свет нельзя. Явление внешнего фотоэффекта было открыто в 1888 г. Г. Герцем и впервые изучено российским физиком А.Г. Столетовым в 1889 г.

Для наблюдения внешнего фотоэффекта можно использовать *вакуумный фотоэлемент*.

Такой фотоэлемент, независимо от его типа, состоит из двух электродов, один из которых, *катод*, выполнен из металла с небольшой работой выхода электронов A , например цезия. При освещении светом такого металла электроны сравнительно легко вырываются с его поверхности. Второй электрод – *анод* – вводится для того, чтобы принять эти электроны и, благодаря возникшему току, зафиксировать их наличие. Катод и анод помещаются в стеклянный вакуумированный баллон. Источник света – лампа накаливания L , подключённая к источнику переменного напряжения. Для измерения тока в этом простейшем случае достаточно установка, не содержащая источника питания (рис. 3.1).

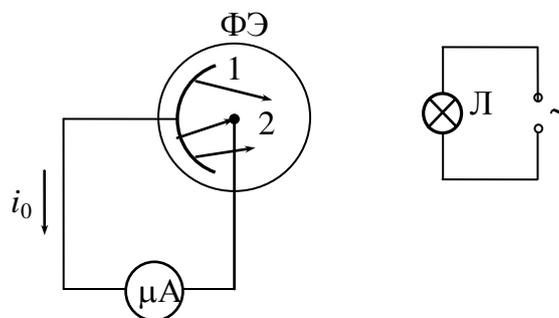


Рис. 3.1

Катод и анод помещаются в стеклянный вакуумированный баллон. Источник света – лампа накаливания L , подключённая к источнику переменного напряжения. Для измерения тока в этом простейшем случае достаточно установка, не содержащая источника питания (рис. 3.1).

При освещении фотоэлемента электроны вылетают из катода и, обладая кинетической энергией, будут удаляться от катода и могут случайно попасть на анод, создав в цепи фотоэлемента ток. Этот ток i_0 будет мал, ибо большинство электронов, выбитых с поверхности катода, движутся произвольно и на анод почти не попадают.

Фототок можно увеличить, если подать на фотоэлемент напряжение, которое заставит выбитые электроны менять случайное направление своего движения и двигаться к аноду. Чем большее напряжение подано на фотоэлемент, тем большее число электронов примет участие в направленном движении, и тем больше будет фототок. Число притянутых электронов, а значит и ток, с увеличением напряжения U на фотоэлементе будут возрастать до тех пор, пока в направленном движении не примут участие *все выбитые светом электроны*. Дальнейшее увеличение напряжения не приведёт более к возрастанию тока – будет достигнут *ток насыщения* i_n (рис. 3.2). График зависимости силы тока от напряжения на фотоэлементе, изображённый на рис. 3.2, называют *вольтамперной характеристикой фотоэлемента*.

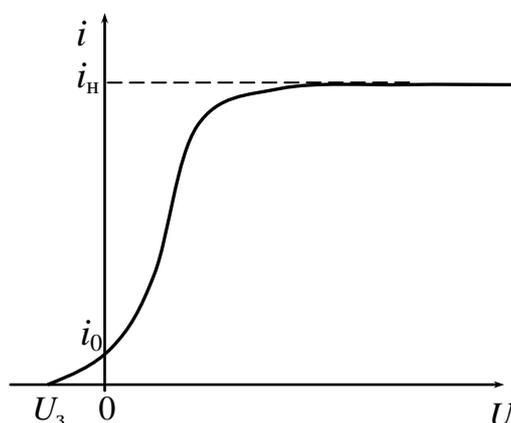


Рис. 3.2

Если сменить знаки на электродах и подать небольшой отрицательный потенциал на анод, то электроны, выбитые светом, уже не будут ускоряться тем элек-

трическим полем, в которое они попадают. Наоборот, поле будет их задерживать, так как анод будет отталкивать фотоэлектроны, испущенные катодом. Ток станет меньше i_0 , но не прекратится, поскольку выбитые электроны, благодаря полученной от света кинетической энергии, будут двигаться против поля и некоторые из них смогут достичь анода. Только при определенном значении обратного напряжения, когда кинетическая энергия даже самых быстрых электронов будет вся расходоваться на работу против сил поля, ток в цепи фотоэлемента станет равным нулю: *это минимальное значение обратного напряжения, при котором фототок становится равным нулю, называют запирающим (или задерживающим) напряжением U_3* . Очевидно, что запирающее напряжение пропорционально максимальной кинетической энергии электронов:

$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = eU_3. \quad (3.1)$$

Измерив U_3 , можно определить максимальные значения кинетической энергии и скорости фотоэлектронов.

Экспериментальные исследования, выполненные в конце XIX века, выявили следующие закономерности внешнего фотоэффекта.

1. При неизменном спектральном составе электромагнитных излучений, падающих на фотокатод, фототок насыщения прямо пропорционален энергетической освещенности катода (иначе: число фотоэлектронов, выбиваемых из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности излучения).

2. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой.

3. Для каждого фотокатода существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота электромагнитного излучения ν_0 (максимальная длина волны), при которой фотоэффект ещё возможен.

Запишем для фотоэффекта закон сохранения энергии. Свет, падая на металл, расходует свою энергию W на два процесса: выбивание электронов с поверхности катода (совершение работы выхода A) и сообщение электронам кинетической энергии

$$W_1 = A + \frac{m\nu^2}{2}. \quad (3.2)$$

Согласно классическим волновым, Максвелловским представлениям о свете, в левой части равенства стоит энергия световой волны, которая, как известно, равна сумме энергий электрического и магнитного полей, комбинацией которых и является световая волна:

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}. \quad (3.3)$$

Увеличение световой энергии, вызванное, например, приближением источника света, должно привести, как это следует из (3.1), к увеличению скорости выбитого электрона, так как работа выхода A является постоянной для данного металла величиной и определяется свойствами самого металла. Следовательно, максимальная скорость выбитых электронов должна зависеть от интенсивности света,

так как интенсивность, по определению, равна средней энергии W , проходящей через единицу площади за единицу времени:

$$I = \frac{W}{St}, \quad (3.4)$$

где S – площадь освещаемой поверхности, t – время.

НО! Из второй закономерности фотоэффекта следует, что скорость электронов зависит не от интенсивности, а от частоты света.

Кроме того, волновые представления о свете приводят к тому, что свет любой частоты, обладая достаточной интенсивностью, должен вызывать фотоэффект. На опыте же наблюдается ситуация, когда свет с частотой меньше некоторой минимальной, вообще не вызывает фотоэффекта, даже при очень большой интенсивности (закономерность 3).

Таким образом, видно, что волновые представления о свете не позволяют полностью объяснить явление фотоэффекта.

Объяснение фотоэффекта оказывается возможным на базе не *волновых*, а *квантовых* представлений о свете. Такую замену в 1905 году предложил Альберт Эйнштейн. С точки зрения квантовых представлений энергию света W следует считать энергией потока квантов света – *фотонов*. Если каждый фотон обладает энергией $h\nu$ (h – постоянная Планка, ν – частота света), то поток фотонов несёт энергию

$$W = N h \nu, \quad (3.5)$$

где N – число фотонов. В этом случае увеличение количества фотонов приводит к увеличению интенсивности света, а увеличение частоты – к увеличению энергии отдельного фотона.

Эйнштейн предположил, что каждый электрон выбивается отдельным фотоном, поэтому в законе сохранения энергии (3.2) в случае фотоэффекта нужно учитывать не всю энергию света, а лишь энергию одного кванта. Записанный таким образом закон сохранения энергии носит название *уравнения Эйнштейна для фотоэффекта*:

$$h\nu = A + \frac{m v_{\max}^2}{2}. \quad (3.6)$$

Таким образом, согласно квантовой теории излучения, энергия фотона расходуется на выбивание электрона и ещё на сообщение ему кинетической энергии.

Закономерности фотоэффекта, описанные выше, прекрасно объясняются квантовой теорией света. Действительно, раз интенсивность света пропорциональна числу фотонов и для выбивания одного электрона нужен один фотон, то увеличение интенсивности приводит к увеличению количества выбитых электронов и, следовательно, фототока (закономерность 1). Согласно определению силы тока ($i = \Delta q / \Delta t$), наибольшее значение фототока должно быть прямо пропорционально числу N всех электронов, выбитых светом из катода за одну секунду:

$$i_h = \frac{eN}{t}. \quad (3.7)$$

Из уравнения Эйнштейна (3.6) видно, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте света и, соответственно, их скорость также возрастает с увеличением частоты (закономерность 2). Если же частота света будет меньше некоторой минимальной частоты ν_0 , такой что:

$$h\nu_0 = A, \quad (3.7)$$

то фотоэффект происходить не будет, так как энергия фотона меньше работы выхода: энергии фотона не хватит на то, чтобы выбить электрон (закономерность 3).

Описание установки

Внешний фотоэффект изучают на установке, состоящей из фотоэлемента и лампы накаливания, размещаемых на оптической скамье, а также цифровых микроамперметра и вольтметра, конструктивно объединенных вместе с реостатом в один электронный блок приборов. Электрическая схема установки представлена на рис. 3.3.

Вакуумный фотоэлемент ФЭ заключён в защитный кожух с окном и представляет собой стеклянный баллон, половина которого внутри покрыта тонким слоем щелочного металла. Этот слой является катодом фотоэлемента. Анодом служит металлическое кольцо, расположенное в центре баллона.

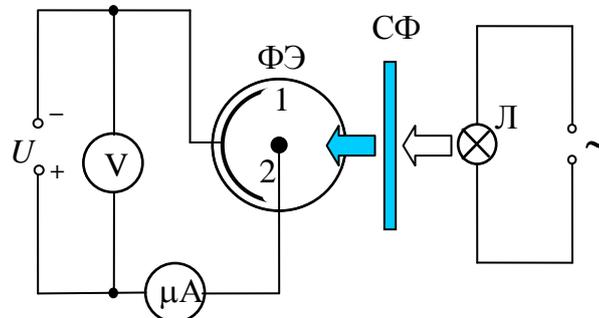


Рис. 3.3

Источником света является галогеновая лампа накаливания Л, напряжение на которой, а значит и интенсивность её свечения, можно регулировать. Монохроматическое излучение получают с помощью светофильтров СФ, закрепленных во вращающейся оправе (длины волн излучения, пропускаемого светофильтрами, указаны на оправе).

Фототок измеряют цифровым микроамперметром. Напряжение на фотоэлементе может изменяться вращением ручки реостата и измеряется цифровым вольтметром. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжений служит специальный переключатель полярности «Задерживающее – Ускоряющее»

Выполнение измерений

Задание 1. Снятие вольтамперной характеристики

Для получения вольтамперной характеристики следует на оптической скамье расположить источник света, набор светофильтров и фотоэлемент как можно ближе друг к другу.

Замеры фототока нужно сделать при **красном** светофильтре. Устанавливая значения напряжения от 0 до 18 В, проведите измерения силы тока и занесите результаты в табл. 3.1.

| $\lambda =$ нм. | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| Напряжение U , В | | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 18 |
| Фототок I , мкА | 0 | | | | | | | | | | |

Для измерения величины задерживающего напряжения необходимо переключить тумблер на корпусе блока питания в положение «Задерживающее». При том же светофильтре определите задерживающий потенциал (т.е. напряжение, при котором фототок становится равным 0), и запишите результат в первую графу табл. 3.1.

Задание 2. Изучение зависимости фототока от интенсивности света

Для того чтобы изучить зависимость величины фототока от интенсивности света, нужно провести измерения силы тока насыщения при разных расстояниях между источником света и фотоэлементом. Изменение этого расстояния как раз и приводит к изменению интенсивности света, попадающего на фотоэлемент (чем ближе источник света, тем более ярко освещён фотоэлемент, соответственно интенсивность света будет большей).

Для того чтобы измерить ток насыщения, надо подать на фотоэлемент достаточно большое напряжение. Для используемой установки оно составляет 18 В. Измерения можно проводить при любом светофильтре (по указанию преподавателя). Измерьте фототок при минимальном расстоянии между лампой и фотоэлементом. Результаты измерения заносятся в табл. 3.2. Повторите измерения ещё два раза, увеличивая расстояние l .

Таблица 3.2

| № п.п. | l , см | $i_{я}$, мкА |
|---------------|----------|---------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| $U = \dots$ В | | |

Задание 3. Изучение зависимости запирающего напряжения от частоты света

На оптической скамье снова расположите источник света, набор светофильтров и фотоэлемент как можно ближе друг к другу. Сменив тумблером полярность напряжения на фотоэлементе, тщательно замерьте то минимальное напряжение, при котором ток становится равным нулю. Измерения необходимо провести три раза для каждого светофильтра (не забудьте записать длину волны λ пропускания светофильтров).

Занесите полученные результаты в табл. 3.3 и используйте при построении графика зависимости величины модуля запирающего напряжения от частоты света $|U_3| = f(\nu)$.

Таблица 3.3

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Цвет светофильтра | | | | | | | |
| Длина волны λ , нм | | | | | | | |
| Частота ν , $\times 10^{14}$ Гц | | | | | | | |
| Запирающее напряжение U_3 , В | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Средний $\overline{U}_3, \text{В}$ | | | | | | | |
|------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|

Анализ и обработка результатов измерений

1. По данным измерений, занесённым в табл. 3.1,
 - постройте график зависимости $i(U)$ (вольтамперную характеристику) и определите по нему i_0 , i_H и U_3 ;
 - определите максимальные значения кинетической энергии W_{\max} и скорости v_{\max} выбитых электронов, используя равенство (3.1).
2. По данным табл. 3.2 постройте график зависимости i_H от расстояния l . Определите количество электронов, выбиваемых светом из катода за одну секунду при установленных расстояниях. Это можно выполнить, вспомнив определение силы тока. Сделайте вывод о зависимости числа выбитых электронов от расстояния. Укажите причину такой зависимости.
3. По данным, полученным в ходе выполнения Задания 3:
 - заполните все ячейки табл. 3.3., вычислив частоту по длине волны, а также среднее значение запирающего напряжения;
 - постройте график $|U_3| = f(\nu)$, и определите по нему граничную частоту ν_0 и угловой коэффициент этой зависимости;
 - определите постоянную Планка h . Сделать это не сложно. Для этого запишите уравнение (3.6) с учётом (3.1) и выразите из него запирающее напряжение U_3 как функцию частоты. Полученное равенство имеет линейный вид $y = kx + b$, где k – это коэффициент при частоте излучения, а постоянная b связана с работой выхода A (подумайте, как?). Сравните полученное значение постоянной Планка с табличным значением и определите относительную ошибку $\varepsilon = |h_{\text{эксп}} - h_{\text{табл}}|/h_{\text{табл}}$.
 - вычислите красную границу λ_0 фотоэффекта для этого металла, а также работу выхода для данного фотоэлемента, используя экспериментальное значение постоянной Планка $h_{\text{эксп}}$.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. Что такое фотоэффект? Какие существуют виды фотоэффекта? Какой фотоэффект изучается в данной работе?
4. Расскажите устройство и принцип действия фотоэлемента.
5. Изобразите вольтамперную характеристику. Объясните, почему она имеет такой вид.
6. Изобразите на одном графике две вольтамперные характеристики при разных расстояниях от лампы до фотоэлемента.
7. Объясните, за счёт чего при одном и том же напряжении на фотоэлементе фототок может быть разным.

8. Изменение какой величины, определяющей энергию света в (3.5), приведёт к увеличению числа выбитых электронов? Изменится ли при этом фототок?
9. Запишите уравнение (3.6). Какие из величин в этих уравнениях для данного фотоэлемента могут меняться в зависимости от условий опыта?
10. Что называется "красной границей" фотоэффекта? Как её определить?
11. Выведите уравнение, описывающее график зависимости $|U_3| = f(\nu)$.
12. Изобразите график зависимости $|U_3| = f(\nu)$. Как с помощью него можно определить постоянную Планка и работу выхода?
13. Какую из наблюдаемых Вами закономерностей можно объяснить, только используя квантовые представления о свете?
14. Какие из наблюдаемых закономерностей не противоречат волновой теории света?
15. Изобразите ожидаемые вольтамперные характеристики, полученные при разной интенсивности света в двух случаях: 1) если справедлива волновая теория; 2) если справедлива квантовая теория.

Работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЧЕРНОТЫ ВОЛЬФРАМА

Цель работы: изучить закономерности и характеристики теплового излучения, научиться пользоваться пирометром, определить коэффициент черноты вольфрама, проверить закон Стефана – Больцмана.

Оборудование: источник излучения (лампа накаливания), пирометр, амперметр, вольтметр, реостат, источник питания.

Краткая теория

Тепловое излучение – это электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счёт его внутренней энергии.

Рассмотрим подробно физические закономерности и характеристики теплового излучения. Яркость светящегося тела пропорциональна энергии, излучаемой им в единицу времени с единицы поверхности во всем диапазоне длин волн – *энергетической светимости*

$$R_3 = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (4.1)$$

где $d\Phi$ – *элементарный световой поток*, то есть энергия, излучаемая поверхностью нагретого тела с бесконечно малой площади dS за единицу времени.

В случае равномерно светящегося тела энергетическую светимость можно определить по формуле:

$$R_3 = \frac{\Phi}{S} = \frac{P}{S}, \quad (4.2)$$

где Φ – *световой поток*, то есть энергия, излучаемая поверхностью нагретого тела с площади S за единицу времени, P – мощность излучения.

Энергетическая светимость зависит от состояния поверхности тела и особенно сильно – от его температуры. Эта зависимость для *абсолютно чёрного тела* определяется *законом Стефана – Больцмана*:

$$R_3 = \sigma T^4, \quad (4.3)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Чтобы характеризовать распределение энергии теплового излучения по длинам волн, вводят *спектральную плотность энергетической светимости*, или, как её иначе называют – *лучеиспускательную способность*

$$r_\lambda = \frac{dR_3}{d\lambda}, \quad (4.4)$$

где dR_3 – энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени с единицы площади поверхности нагретого тела в бесконечно малом интервале длин волн от λ до $(\lambda + d\lambda)$.

Значения r_λ неодинаковы для различных длин волн и для разных температур. Характер зависимости лучеиспускательной способности от длины волны и температуры представлен графиками на рис. 4.1. Основная энергия, как следует из графиков, излучается в довольно узком интервале длин волн, от положения которого на оси λ зависит цвет нагретого тела. Из определения r_λ (4.3) нетрудно показать, что энергетическая светимость равна площади под графиком зависимости $r_\lambda(\lambda)$ во всём диапазоне длин волн:

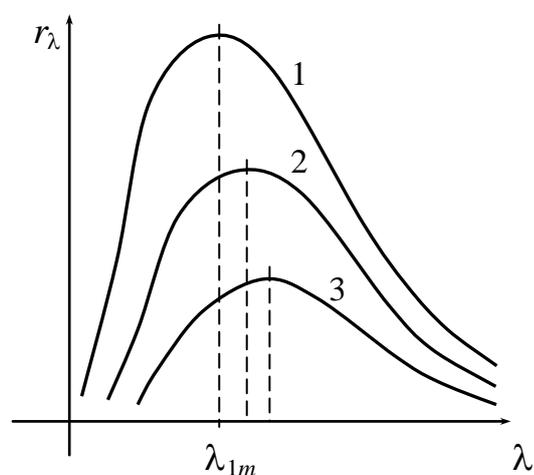


Рис. 4.1

$$R_3 = \int_0^{\infty} r_\lambda d\lambda. \quad (4.5)$$

Каждое тело (и холодное и нагретое) поглощает энергию. *Спектральной поглощательной способностью* тела a_λ называют отношение поглощённого телом светового потока $d\Phi'$ ко всему падающему на тело потоку $d\Phi$ в интервале длин волн от λ до $(\lambda + d\lambda)$:

$$a_\lambda = \frac{d\Phi'}{d\Phi}. \quad (4.6)$$

Спектральная поглощательная способность зависит от длины волны излучения и от температуры поглощающей поверхности. Тела поглощают свет также избирательно: одни в одной области длин волн, другие – в другой. *Цвет* тела определяется волнами, которые не поглощаются, и, следовательно, отражаются поверхностью тела. *Серые тела* имеют одинаковый коэффициент поглощения для всех длин волн: $a_\lambda = \text{const}$, значение которой меньше единицы. Если поглощённый поток равен падающему на тело потоку для всех длин волн, то тело называют *абсолютно черным*. В дальнейшем вы увидите, что абсолютно чёрные тела хорошо излучают энергию и могут выглядеть очень яркими. К примеру, Солнце

является достаточно хорошим примером чёрного тела (правда только в оптическом диапазоне).

Опыт показывает: чем больше поглощательная способность тела, тем лучше оно излучает, будучи нагретым. Количественное соотношение между r_λ и a_λ даёт закон излучения Кирхгофа: отношение лучеиспускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от материала и состояния поверхности тела и является универсальной функцией длины волны и температуры:

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_2 = \dots = r_{\lambda,T}^{\text{а.ч.т.}}. \quad (4.7)$$

Отсюда следует, что максимальной энергетической светимостью и, следовательно, максимальной яркостью при данной температуре обладает абсолютно чёрное тело. Закон Кирхгофа иллюстрирует рис. 4.2, на котором представлен график зависимости спектральной плотности энергетической светимости r_λ от длины волны для абсолютно чёрного тела (кривая 1), а также кривые 2 и 3, характеризующие излучение серых тел.

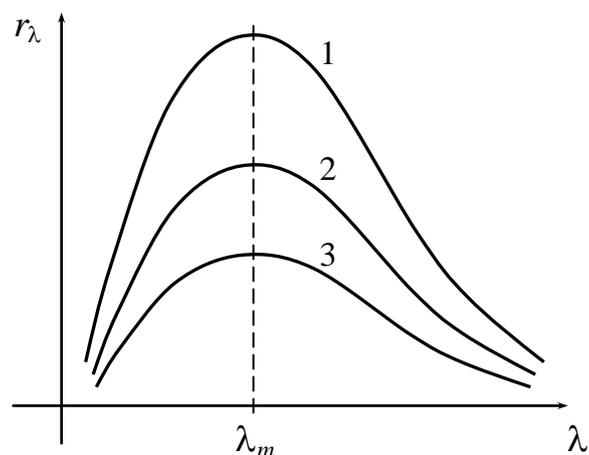


Рис. 4.2

Ясно, что для определённой длины волны лучеиспускательная способность абсолютно чёрного тела превосходит r_λ

любого серого тела. Очевидно также, что сравнение величин $R_3^{\text{а.ч.т.}}$ и R_3 , определяющих яркость, следует вести при определённой длине волны.

Выше шла речь о сравнении энергетических светимостей разных тел, нагретых до одинаковой температуры. С увеличением температуры любого тела его энергетическая светимость возрастает. Одновременно происходят изменения и в спектральном составе излучения: максимум кривой зависимости $r_\lambda(\lambda)$ смещается в сторону коротких волн (см. рис. 4.1).

В данной работе определяется поглощательная способность вольфрамовой нити светящейся лампочки. Лабораторная установка даёт возможность определять мощность, рассеиваемую лампой.

Полагая, что вся подведённая мощность излучается, нетрудно вычислить значение поглощательной способности $a_{\lambda,T}$ при известной площади S излучающей поверхности, которая в нашем случае равна площади поверхности нити лампы. Её значение для конкретной лампы указано в инструкции на рабочем столе в лаборатории.

Метод основан на законе Стефана – Больцмана (4.2), записанным для серого тела в соответствии с интегральным равенством (4.5):

$$R_3 = a\sigma T^4, \quad (4.8)$$

где a – поглощательная способность серого тела, *не зависящая от λ* ; σ – постоянная Стефана – Больцмана; T – абсолютная температура тела.

При подготовке к работе запишите равенство (4.8), и, используя (4.2), замените в нём энергетическую светимость R_λ через мощность тока и площадь спирали лампочки. Проверьте себя, сравнивая размерности r_λ , R_λ и мощности.

Из полученного соотношения выразите коэффициент поглощения a через силу тока I , напряжение U , площадь S и температуру T . Это и будет расчётная формула для вычисления поглощательной способности.

Описание установки

Схема установки, с помощью которой Вы будете измерять температуру нити, изображена на рис. 4.3. Блок питания (понижающий трансформатор) заключён в металлическую коробку. Источник излучения (электрическая лампа) установлен на стойке. В схеме используется проволочный реостат, с помощью которого можно менять накал нити лампы. Амперметром измеряется сила тока в цепи, а вольтметром – напряжение на лампе.

Температура излучающей нити лампы измеряется в данной работе оптическим пирометром. *Пирометрами* называют приборы, с помощью которых можно измерить температуру раскалённого тела без непосредственного контакта с ним. Этот способ является единственно возможным в случае, когда температура объекта высока и термометр (либо термометр) её не выдерживает, или когда объект недоступен (например, звезды). Действие различных типов пирометров основано на законах теплового излучения.

В предлагаемой работе используется *яркостный оптический пирометр* с "исчезающей" нитью. Принцип его работы состоит в сравнении яркости *абсолютно чёрного* тела с яркостью того *серого* тела, температуру которого нужно измерить. Сравнение этих яркостей следует вести при определённой длине волны. Для этого в пирометрах устанавливается светофильтр, выделяющий из всего спектра излучения узкий интервал длин волн. Именно в этом интервале ($\lambda \cong 660$ нм) и сравниваются яркости излучающего тела и нити пирометра.

Внутри пирометра имеется прямая нить, накал которой осуществляется через переменный резистор, регулирующий силу тока в нити, и, следовательно, изменяющий её яркость. С помощью линз изображение этой нити проецируется на изображение тела, температуру которого нужно определить.

Регулятором пирометра устанавливается такой ток, при котором яркость нити в пирометре совпадает с яркостью излучающего тела. При этом часть нити на

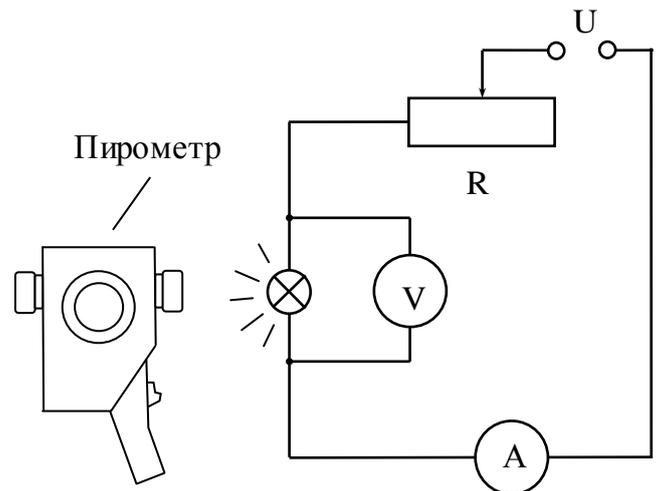


Рис. 4.3

фоне излучающего тела становится "невидимой" (рис. 4.4, а). Чем выше яркость тела, тем бóльший ток нужно устанавливать в пирометре. По шкале прибора, измеряющего этот ток, при соответствующей градуировке шкалы можно определить температуру тела.

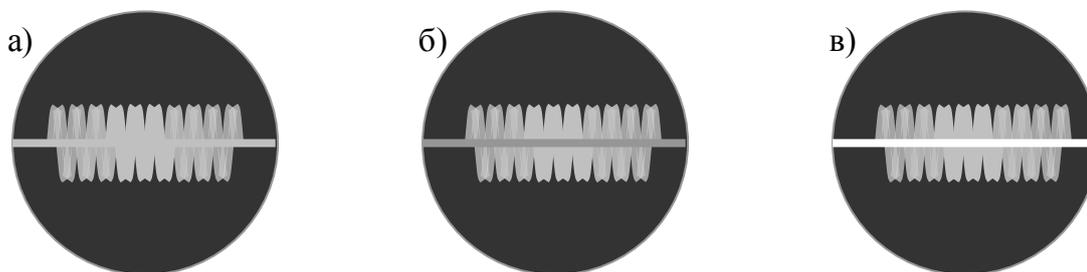


Рис. 4.4

Градуировка пирометра осуществляется по абсолютно черному телу, поэтому при измерении температуры других тел нужно вводить поправки. Так как серое тело имеет меньшую яркость, нежели чёрное тело при той же температуре, то к показанию пирометра нужно прибавить поправку ΔT , которая зависит от температуры и материала излучающего тела. Для *вольфрама*, из которого делают нити ламп накаливания, зависимость поправки ΔT от температуры приведена в Приложении I (и в инструкции на рабочем месте) в виде графика $\Delta T(t^\circ)$.

Данный способ определения температуры содержит субъективные ошибки, поскольку связан с установлением равенства яркостей "на глаз" – субъективно. Поэтому измерения температуры следует делать несколько раз, усредняя затем результат.

Выполнение измерений

Произведите измерения в соответствии с подробной инструкцией, имеющейся на рабочем месте. Измерение температуры нити следует проводить не менее двух раз при пяти – шести различных значениях напряжения. Записывая среднее значение температуры, следует помнить о точности измерений. Ознакомившись со шкалой пирометра, установите его абсолютную погрешность и производите все записи в соответствии с ней. Результаты измерений занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

| № п.п. | $U, В$ | $I, А$ | $t_1, ^\circ C$ | $t_2, ^\circ C$ | $\langle t \rangle, ^\circ C$ | ΔT | $\langle t \rangle + \Delta T, ^\circ C$ | $T, К$ | a |
|--------|--------|--------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------|--|--------|-----|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Анализ и обработка результатов измерений

1. По измеренным значениям температуры t_1 и t_2 вычислите средние значения температуры нити лампочки в градусах Цельсия при различных напряжениях.

2. По этой температуре с помощью графика $\Delta T(t^\circ)$ найдите поправки к показаниям пирометра. Выразите показания пирометра и уточнённую температуру вольфрамовой нити лампы в единицах абсолютной шкалы температур — кельвинах. Всё записывайте в табл. 4.1.

3. Вычислите с разумной точностью значения коэффициента черноты при различных напряжениях и запишите в последнюю колонку табл. 4.1.

4. После вычисления коэффициента черноты a следует заполнить *таблицу обработки результатов измерений* и сделать вывод, в котором оценить точность и правдоподобность полученного значения поглотительной способности.

5. По данным измерений составьте таблицу значений излучаемой мощности и соответствующей температуры, а также их логарифмов (табл. 4.2). Про-

логарифмировав закон Стефана – Больцмана (4.8) с учётом (4.2), можно показать, что зависимость $\ln P$ от $\ln T$ должна быть линейной функцией, а график этой зависимости – прямой линией с угловым коэффициентом, равным показателю степени при температуре. Постройте график зависимости $\ln P(\ln T)$ и определите угловой коэффициент. Сравните его с показателем степени при T в законе Стефана – Больцмана.

Таблица 4.2

| № п.п. | P , Вт | T , К | $\ln P$ | $\ln T$ |
|-----------|----------|---------|---------|---------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. Выведите рабочую формулу для расчета поглотительной способности в данной работе.
4. Опишите применяемый здесь метод определения температуры. Верно ли показывает пирометр температуру реальных нагретых тел?
5. Изобразите графики зависимостей $r(\lambda, T)$ для абсолютно чёрного и для серого тела.
6. Найдите связь между r_λ и r_ν и их размерности.
7. Покажите, как ведут себя кривые $r_\lambda = f(\lambda)$ при повышении температуры.
8. Определите размерность R_ν в уравнениях (4.1) и (4.6).
9. Дайте определения основных характеристик теплового излучения.
10. Сформулируйте и запишите закон Кирхгофа.
11. Объясните, от чего зависит и как образуется цвет окружающих нас тел.
12. Получите формулу зависимости мощности от температуры и прологарифмируйте её.

Цель работы: исследовать прохождение света через поляриды, проверить закон Малюса, оценить качество поляридов, исследовать свет, прошедший через пластины и отраженный от них, найти угол Брюстера для стеклянной пластины.

Оборудование: оптическая скамья, источник света, поляризатор в оправе, анализатор, совмещённый с фотоэлементом, набор стеклянных пластин, источник питания, микроамперметр.

Краткая теория

Из теории Максвелла следует, что световая волна является поперечной. Поперечность световых волн (как и любых других электромагнитных волн) выражается в том, что колебания векторов \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны направлению распространения волны (рис. 5.1). Плоская монохроматическая волна, распространяющаяся в вакууме вдоль оси x , описывается уравнениями:

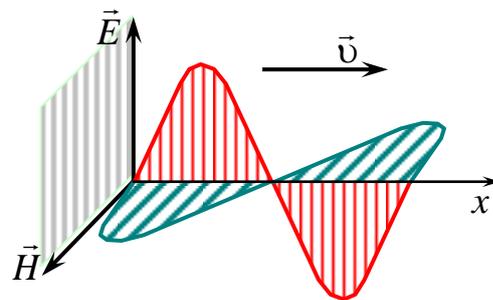


Рис. 5.1

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_0 \right], \quad (5.1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_0 \right], \quad (5.2)$$

где \vec{E} и \vec{H} – текущее значение напряженности электрического и магнитного поля, \vec{E}_m и \vec{H}_m – амплитуды колебаний, ω – частота колебаний, φ_0 – начальная фаза колебаний.

При взаимодействии света с веществом переменное электрическое поле воздействует на отрицательно заряженные электроны атомов и молекул этого вещества, в то время как действие со стороны магнитного поля на заряженные частицы незначительно. Поэтому в процессах распространения света главную роль играет вектор \vec{E} , и дальнейшем мы будем говорить только о нём.

Большинство источников света состоит из огромного количества излучающих атомов, и поэтому в световом луче присутствует большое количество волн с различной пространственной ориентацией векторов \vec{E} . Кроме того, эта ориентация беспорядочно меняется за чрезвычайно малые промежутки времени (рис. 5.2, а). Подобное излучение называется неполяризованным, или *естественным* светом. Свет, в котором направления колебаний вектора \vec{E} каким-либо образом упорядочены, называется *поляризованным*, а процесс получения поляризованного света называется *поляризацией*. Если колебания вектора \vec{E} происходят в одной плоскости, то волна называется *плоско-поляризованной* или *линейно-поляризованной* (рис. 5.2, б). *Частично поляризованным* называется свет, в котором имеется преимущественное направление колебаний векторов \vec{E} (рис. 5.2, в).

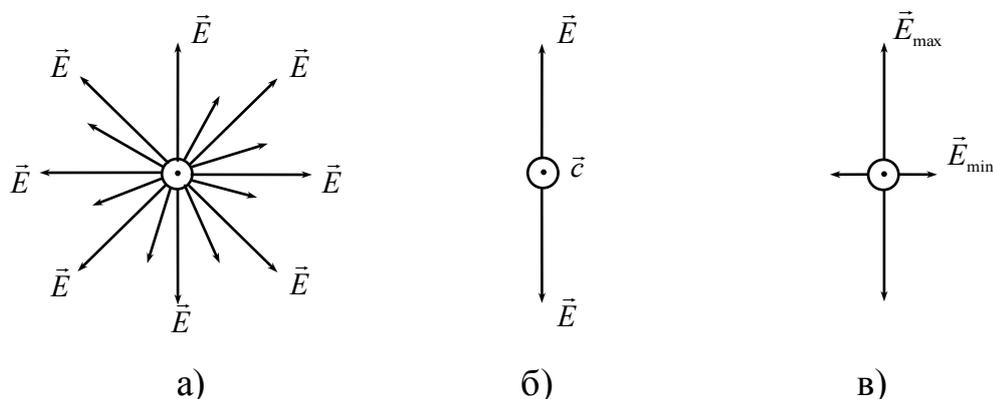


Рис. 5.2

Поляризация света наблюдается при прохождении света через анизотропные вещества. Основное свойство таких веществ заключается в том, что они могут пропускать световые волны лишь в строго определённой плоскости, которую называют *плоскостью поляризации*. Плоскость поляризации – это плоскость, проходящая через направление колебаний электрического вектора линейно поляризованной световой волны и направление распространения этой волны.

В настоящее время для получения и исследования поляризованного света применяют *поляроиды*. Они изготавливаются из очень мелких кристаллов турмалина или геропатита (сернокислого йод-хинина), нанесённых на прозрачную плёнку.

Рассмотрим следующий опыт. Возьмем два поляроида и источник света (рис. 5.3). Первый поляроид называется поляризатором, т.к. он поляризует свет. Его плоскостью поляризации является плоскость *ППс*. После прохождения через поляризатор вектор \vec{E} будет колебаться в этой плоскости. Вращая поляризатор вокруг направления светового пучка, мы не заметим никаких изменений в интенсивности прошедшего через него света. Подумайте почему? Анализ света на поляризацию делают с помощью второго поляроида, через который пропускают исследуемый свет. В этом случае второй поляроид называется *анализатором*, его плоскостью поляризации является плоскость *ААс*. Вращая анализатор, мы заметим, что интенсивность света будет максимальной, если плоскости *ППс* и *ААс*

совпадают, и минимальной, если эти плоскости перпендикулярны. Если же эти плоскости составляют некоторый угол, интенсивность света будет принимать промежуточное значение.

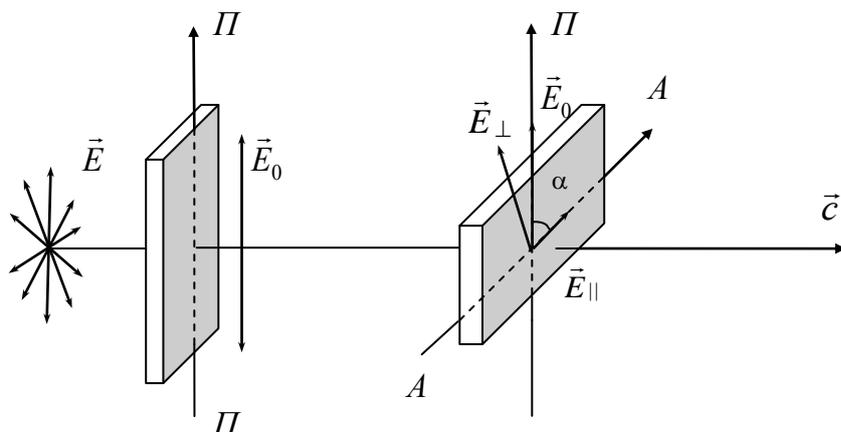


Рис. 5.3

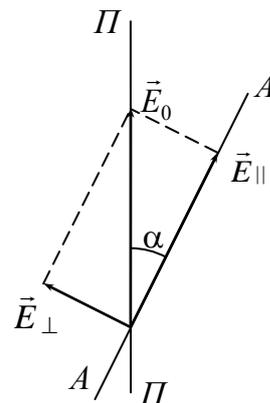


Рис. 5.4

Найдем зависимость между интенсивностью света I и углом α . Обозначим амплитуду электрического вектора луча, прошедшего через поляризатор, буквой E_0 . Плоскость колебаний анализатора AAs повернута относительно плоскости колебаний поляризатора $PIPs$ на угол α (см. рис. 5.4). Разложим вектор \vec{E}_0 на составляющие: параллельную плоскости колебаний анализатора \vec{E}_{\parallel} и перпендикулярную к ней \vec{E}_{\perp} . Параллельная составляющая \vec{E}_{\parallel} пройдет через анализатор, а перпендикулярная \vec{E}_{\perp} – нет.

Из рис. 5.4 следует, что амплитуда световой волны за анализатором

$$E_{\parallel} = E_0 \cos \alpha. \quad (5.3)$$

Интенсивность света равна средней энергии $\langle W \rangle$ световой волны, прошедшей сквозь единицу площади за единицу времени:

$$I = \frac{\langle W \rangle}{S \cdot t}, \quad (5.4)$$

где S – площадь, по которой распределяется энергия; t – время. Поскольку энергия света – это энергия электрического и магнитного полей, то её величина пропорциональна квадратам напряженностей этих полей:

$$W = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} \right) V = \epsilon_0 \epsilon E^2 V, \quad (5.5)$$

так как $\epsilon_0 \epsilon E^2 = \mu_0 \mu H^2$.

Возводя равенство (5.3) в квадрат и умножая обе его части на $\epsilon_0 \epsilon V/2$, получим после деления на S и t следующее выражение для интенсивности света, прошедшего через анализатор:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (5.6)$$

Полученное равенство носит название *закона Малюса*: интенсивность света, прошедшего через анализатор, равна интенсивности света, прошедшего через по-

ляризатор, умноженной на квадрат косинуса угла между плоскостями поляризации анализатора и поляризатора.

Заметим, что свет, прошедший через поляризатор, станет не только плоско поляризованным, но и уменьшит свою интенсивность в два раза. Если интенсивность естественного света считать одинаковой во всех направлениях, то интенсивность света за поляризатором будет

$$I = \int_0^{2\pi} (I_{\text{ест}} \cos^2 \alpha) d\alpha = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}. \quad (5.7)$$

Закон Малюса строго выполняется лишь для идеальных поляроидов. Чтобы установить, поляризовался свет полностью или частично, нужно найти *степень поляризации* P , за меру которой принимают отношение

$$P = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (5.8)$$

где I_{max} и I_{min} – наибольшая и наименьшая интенсивности света за анализатором, соответствующие напряжённости E_{max} и E_{min} на рис. 5.2, в.

Явление поляризации можно также наблюдать при отражении или преломлении света на границе двух изотропных диэлектриков. При этом в отраженном луче будут преобладать колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рис. 5.5 они обозначены точками). Опытным путем было показано, что степень поляризации в отраженном луче зависит от величины угла падения, причем с возрастанием угла падения доля поляризованного света растет, и при определенном его значении отраженный свет оказывается полностью поляризованным. Брюстер установил, что величина этого угла полной поляризации зависит от относительного показателя преломления и определяется соотношением:

$$\text{tg} \alpha_{\text{бр}} = n_2/n_1. \quad (5.9)$$

Соотношение носит название закона Брюстера, а угол $\alpha_{\text{бр}}$ называют углом Брюстера. При дальнейшем увеличении угла падения степень поляризации света снова уменьшается. Таким образом, при угле падения, равном углу Брюстера, отраженный свет линейно поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Используя (5.9) и закон преломления, можно показать, что при падении под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи составляют 90° . Проверьте это.

Простейшее физическое толкование закона Брюстера состоит в следующем. Электрическое поле падающей волны вызывает в диэлектрике колебания электронов. Направление этих колебаний совпадает с направлением электрического вектора преломленной волны. Эти колебания возбуждают на поверхности раздела отраженную волну, распространяющуюся от диэлектрика. Но линейно колеблющийся электрон не излучает в направлении своих колебаний. Таким образом, в

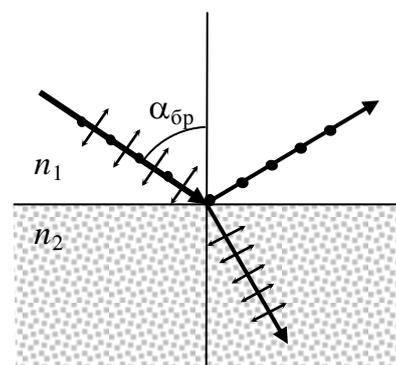


Рис. 5.5

отраженной волне колебания вектора \vec{E} происходят только в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

При падении света под углом Брюстера преломленный луч также поляризуется. В преломленном луче будут преобладать колебания, параллельные плоскости падения (на рис. 5.5 они обозначены стрелками). Поляризация преломленных лучей при этом угле падения будет максимальной, но далеко не полной. Если же подвергнуть преломленные лучи второму, третьему и т.д. преломлению, то степень поляризации возрастет. Поэтому для поляризации света можно использовать 8–10 пластинок (так называемая стопа Столетова). Прошедший через них свет окажется практически полностью поляризованным. Таким образом, эта стопа может служить поляризатором или анализатором. В нашей установке наборы из 2–12 пластин используются в качестве поляризатора.

Описание установки

Для исследования поляризации используется укрепленная на оптической скамье установка, схема которой приведена на рис. 5.6.

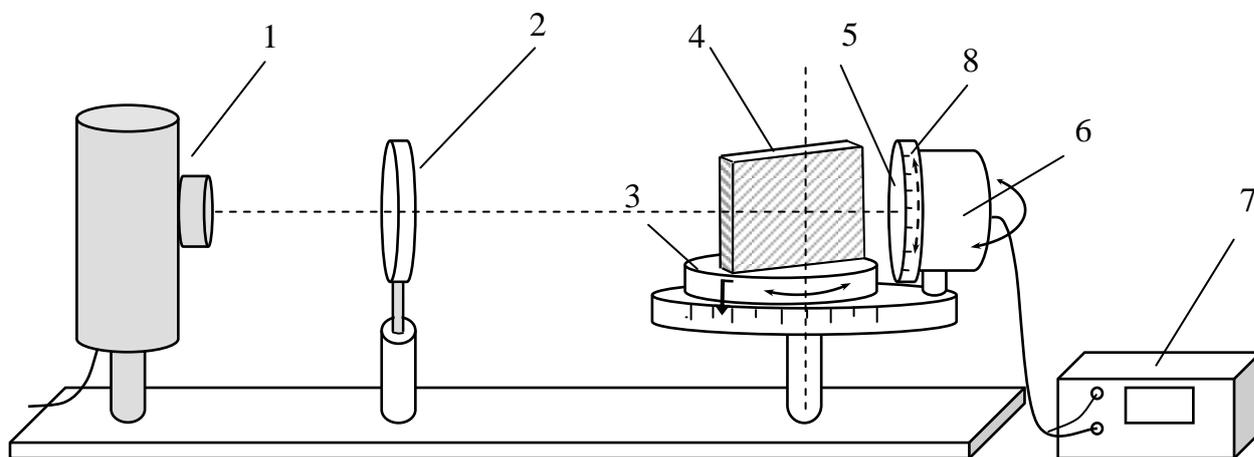


Рис. 5.6

Цифрами на схеме обозначены: 1 – лампа, 2 – съёмный **поляризатор**, 3 – поворотный **столик**, 4 – съёмная стеклянная пластина, одеваемая на штыри поворотного столика, 5 – **анализатор**, 6 – **фотоэлемент**, 7 – **измеритель** интенсивности света (ИИС), преобразующий энергию света в электрический сигнал; его показания пропорциональны световому потоку, падающему на фотоэлемент. Поворотный столик 3 может вращаться вокруг вертикальной оси, тем самым можно изменять угол падения света на стеклянную пластину 4. Для измерения этого угла падения имеется специальная шкала. Положение столика фиксируется винтом. Анализатор 5 может вращаться вокруг горизонтальной оси, стрелкой на нём указано положение плоскости поляризации. У анализатора имеется **шкала** 8, по которой определяется положение его плоскости поляризации (ААс). На поляризаторе 2 также имеется стрелка, которая показывает положение его плоскости поляризации ППс. Фотоэлемент, совмещенный с анализатором, также может вра-

щаться вокруг вертикальной оси. Тем самым можно проводить измерения интенсивности света, отраженного от стеклянной пластины.

Выполнение работы

Задание 1. Проверка закона Малюса

1. Установите съемный поляризатор 2 (съемную пластину 4 уберите).
2. Включите лампу. Поверните фотоэлемент-анализатор 6 так, чтобы на него попадал свет от лампы. Добейтесь симметричного расположения элементов установки относительно луча света.
3. Установите положение ААс по шкале 8 на 0° . Запишите показания измерителя 7 в табл. 5.1. Это будет интенсивность света в относительных единицах, прошедшего через поляризатор и анализатор. Повторите измерения, изменяя положение ААс от 0° до 360° через 10° , и также запишите их в табл. 5.1.

Таблица 5.1

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\varphi, ^\circ$ | 0 | 10 | 20 | ... | ... | ... | 330 | 340 | 350 | 360 |
| I | | | | | | | | | | |

Задание 2. Исследование поляризации отраженного света

1. Уберите съемный поляризатор 2 и установите одну съемную пластину 4 с числом стекол в обойме $N = 2$ (либо по указанию преподавателя).
2. Установите угол падения света на пластину 25° . Закрепите столик винтом.
3. Установите вертикальное положение ППА (это соответствует 0° по шкале 8).

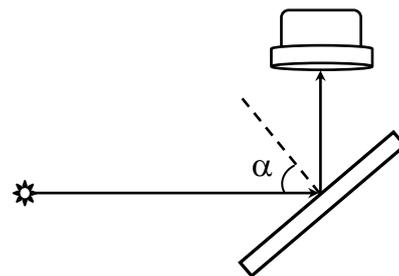


Рис. 5.7

4. Поверните фотоэлемент так, чтобы на него попадал **отраженный от пластины** свет (см. рис. 5.7). Вращением фотоэлемента 6 добейтесь **максимального** показания ИИС (I_{\max}), запишите его в таблицу 5.2.
5. Установите горизонтальное положение ААс (90° по шкале 8), не меняя положение самого блока с фотоэлементом. Показания ИИС запишите в таблицу 5.2 (I_{\min}).
6. Повторите пункты 2-5 для всех углов падения света, указанных в табл. 5.2.

Таблица 5.2

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Угол падения света $\varphi, ^\circ$ | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| $I_{\max} (\alpha = 0^\circ)$ | | | | | | | | | | |
| $I_{\min} (\alpha = 90^\circ)$ | | | | | | | | | | |
| Степень поляризации $P, \%$ | | | | | | | | | | |

Задание 3. Исследование поляризации преломленного света

1. Установите съемную пластину с двумя стеклами ($N = 2$).

2. По данным табл. 5.2 вычислите угол, при котором степень поляризации будет максимальной (из (5.9) следует, что его значение будет больше 45°). Установите этот угол падения света на пластину.

3. Установите фотоэлемент для регистрации интенсивности прошедшего через пластины света согласно рис. 5.8 (максимальное значение показаний ИИС подтверждает хорошее попадание света на фотоэлемент).

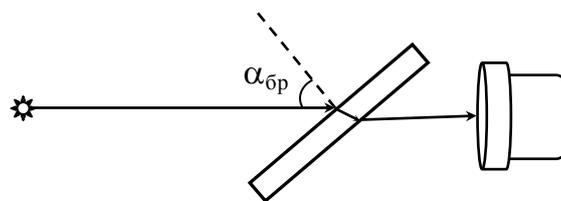


Рис. 5.8

4. Обратите внимание, что преломленный свет поляризован в плоскости падения, поэтому максимальное значение интенсивности будет при положении ААс 90° по шкале 8 (вопрос 11). Измерьте интенсивность прошедшего через пластины света при двух положениях ААс: при 90° и при 0° . Запишите результаты измерений в табл. 5.3.

5. Аналогичные измерения проведите для $N = 4, 7, 12$ пластин. Запишите результаты измерений в табл. 5.3.

Таблица 5.3

| Число пластин N | Показания ИИС | | Степень поляризации P |
|-------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | при $\alpha = 0^\circ$ | при $\alpha = 90^\circ$ | |
| 2 | | | |
| 4 | | | |
| 7 | | | |
| 12 | | | |

Анализ и обработка результатов измерений

1. По данным табл. 5.1 заполните табл. 5.4. Для этого в первый столбец запишите все значения углов падения φ , для которых значения $\cos^2\varphi$ будут одинаковы (например, $\cos^2 10^\circ = \cos^2 170^\circ = \cos^2 190^\circ = \cos^2 350^\circ$). В последний столбец запишите средние значения интенсивностей для этих углов падения.

По данным табл. 5.4 постройте график зависимости $\langle I \rangle = f(\cos^2\varphi)$. Выполняется ли закон Малюса? Вычислите степень поляризации света в данном случае. Сделайте выводы.

2. Заполните полностью табл. 5.2. В чем состоит закон Брюстера? По данным табл. 5.2 постройте на одном графике зависимости $I_{\max} = f(\varphi)$ и $I_{\min} = f(\varphi)$, определите по ним угол Брюстера. На отдельном графике постройте зависимость $P = f(\varphi)$. Вычислите показатель преломления n материала пластины. Сделайте выводы.

3. Заполните полностью табл. 5.3 и постройте по ее данным график зависимости $P = f(N)$. Сделайте выводы.

4. Как расположены плоскости поляризаций света, прошедшего через поляризатор, отраженного от него? Сделайте рисунок.

Таблица 5.4

| $\varphi, ^\circ$ | $\cos^2\varphi$ | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 | $\langle I \rangle$ |
|-------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| 0, ... | | | | | | |
| 10, ... | | | | | | |
| 20, ... | | | | | | |
| 30, ... | | | | | | |
| 40, ... | | | | | | |
| 50, ... | | | | | | |
| 60, ... | | | | | | |
| 70, ... | | | | | | |
| 80, ... | | | | | | |
| 90, ... | | | | | | |

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. О каком свойстве электромагнитной волны свидетельствует поляризация?
4. Чем отличается естественный свет от плоскополяризованного?
5. Какой нужно поставить опыт, чтобы узнать степень поляризации света?
6. Что такое I_0 и I в уравнении (5.6)?
7. Выведите закон Малюса.
8. Чему равна степень поляризации естественного света?
9. Назовите способы получения плоскополяризованного света.
10. Определите размерность величины V в формуле (5.5) и назовите её.
11. Сформулируйте закон Брюстера.
12. Укажите положение плоскостей поляризации отраженного и преломленного света.
13. При каком положении плоскости поляризации анализатора интенсивность отраженного от пластины (прошедшего через пластины) света будет максимальна (при каком минимальна)?

Работа № 6

ГРАДУИРОВКА МОНОХРОМАТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Цель работы: проградуировать монохроматор, определить длины волн спектра водорода, вычислить и сравнить экспериментальное и теоретическое значения постоянной Ридберга, рассчитать энергии тех уровней, переходы между которыми вызвали появление наблюдаемых линий спектра.

Оборудование: монохроматор, лампа дневного света (ртутная), водородная трубка, пусковое устройство для неё.

Краткая теория

Как известно, вещества в твердом состоянии испускают излучение со сплошным спектром, одинаковым для всех тел. В разреженных газах или в парах металлов взаимодействие между отдельными атомами незначительно. Поэтому спектры таких газов состоят из отдельных спектральных линий различных частот, строго определенных для каждого химического элемента. Такой спектр называется линейчатым. Таким образом, по линейчатому спектру можно определить, какой элемент присутствует в газе.

Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов. Было замечено, что линии в спектрах атомов расположены не беспорядочно, а объединяются в группы, которые получили название *серий*. Некоторые линии (или полностью серии линий) лежат в видимой области спектра, но большая часть находится в инфракрасной или ультрафиолетовой областях спектра. Проще всего пронаблюдать эти закономерности на примере простейшего атома – атома водорода.

В 1885 году швейцарский физик Бальмер пронумеровал спектральные линии видимого излучения атома водорода и установил связь между длиной волны линии и её номером:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (6.1)$$

где λ – длина волны; R – опытная постоянная (постоянная Ридберга); m – номер линии. Однако, нумерация начиналась не с единицы, а с трёх: $m_1 = 3$, $m_2 = 4$, $m_3 = 5$ и т. д.

Формула (6.1) называется формулой Бальмера, а соответствующая серия линий – серией Бальмера. Всего в серии Бальмера насчитывают около 30 линий, часть из которых уходит в ультрафиолетовую область спектра. Позднее были обнаружены и другие серии. В ультрафиолетовой области спектра находится серия Лаймана, остальные серии лежат в инфракрасной области. Линии этих серий могут быть представлены аналогичными формулами:

серия Лаймана (в ультрафиолетовой области)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right); \quad (6.2)$$

серия Пашена (в близкой инфракрасной области)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (6.3)$$

Таким образом, длину волны любой линии можно представить одной формулой, которая называется сериальной:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (6.4)$$

где $n = 1, 2, 3, 4, 5$; m и n – целые числа. При заданном n число m принимает значения, начиная с $n + 1$.

Объяснение закономерностей расположения линий в спектре можно получить, основываясь на теории атома водорода, предложенной Н. Бором. Опытами Э. Резерфорда было установлено, что атом любого элемента состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого расположены отрицательно заряженные электроны. Электроны вращаются вокруг ядра подобно тому, как планеты вращаются вокруг Солнца. На электроны со стороны ядра действует сила Кулона, которая сообщает им центростремительное ускорение. По II закону Ньютона

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}. \quad (6.5)$$

Согласно электромагнитной теории вращающийся по орбите электрон возбуждает вокруг себя переменное электромагнитное поле. Это означает, что вращение электрона должно сопровождаться излучением, на которое электрон тратит часть своей энергии. В результате электрон должен упасть на ядро. В действительности этого не происходит, и атом является устойчивой системой. Кроме того, из формулы (6.5) следует, что с уменьшением радиуса орбиты скорость электрона возрастает, т. е. период обращения уменьшается. Это должно привести к непрерывному увеличению частоты излучаемых электромагнитных волн, и спектр излучения атома должен быть сплошным. Но опыты показывают, что атом излучает линейчатый спектр. Выход из создавшегося положения предложил Бор в 1913 году.

Бор сформулировал законы движения электрона в атоме и характер излучения атома в виде постулатов, которые дали объяснение экспериментальным фактам.

Первый постулат. Электрон в атоме может двигаться только по строго определенным – стационарным орбитам, находясь на которых, он не излучает энергию. Радиус стационарных орбит определяется из условия: момент импульса электрона кратен постоянной Планка:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}; \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (6.6)$$

Второй постулат. Излучение испускается или поглощается в виде светового кванта, энергия которого пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu. \quad (6.7)$$

Энергии $h\nu$ при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается переход электрона:

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (6.8)$$

На рис. 6.1 схематически показаны переходы электрона, которые связаны

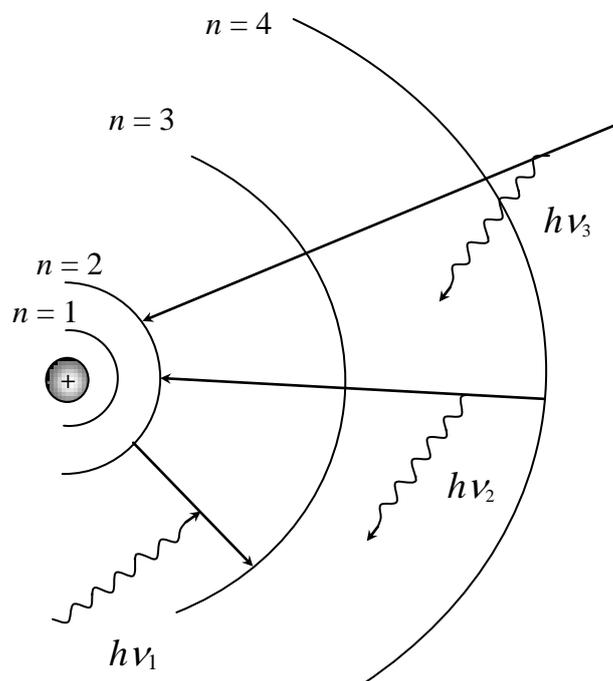


Рис. 6.1

с появлением видимых линий в спектре атома водорода. Физический смысл чисел n и m легко понять с помощью формулы (6.8): это номера орбит, между которыми происходит переход электрона. При переходе с ближней орбиты на более удалённую от ядра (на рисунке это переход $2 \rightarrow 3$) происходит поглощение энергии $h\nu_1$. И наоборот, излучение энергии происходит при переходе электрона с дальних орбит на более близкие к ядру ($4 \rightarrow 2$, $5 \rightarrow 2$).

Используя формулы (6.4)–(6.6), можно получить выражение для постоянной Ридберга через фундаментальные постоянные (h , e , m , c). Вычисленное по этой формуле значение постоянной Ридберга с большой точностью совпадает с экспериментальным. Опытным путем это значение можно получить с помощью формулы (6.1) по нескольким известным длинам волн.

Несмотря на удачное объяснение спектральных закономерностей водородоподобных атомов, теория Бора обладает рядом недостатков. В частности, она не может объяснить спектры излучения более сложных атомов и различную интенсивность спектральных линий. Эти трудности были преодолены квантовой теорией, показавшей неприменимость классических представлений к микрообъектам.

Описание установки

В данной лабораторной работе Вы будете наблюдать видимую часть спектра

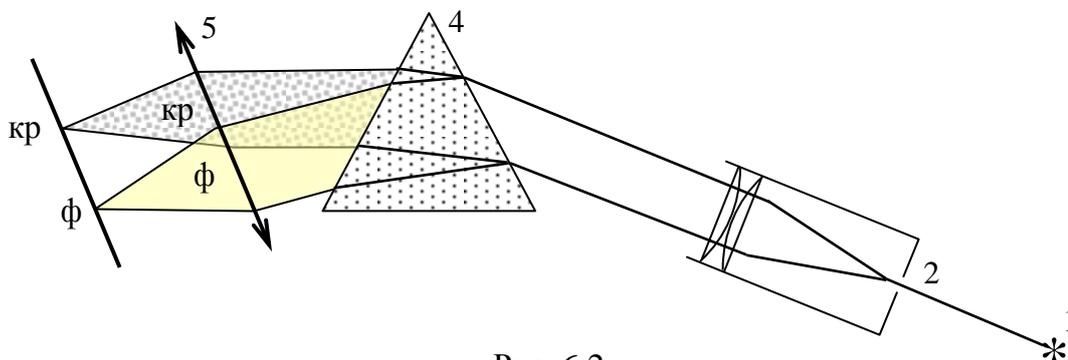


Рис. 6.2

атом водорода. Для получения спектра используется монохроматор УМ-2. Оптическая схема прибора показана на рис. 6.2.

Основной частью монохроматора является призма 4, разлагающая свет в спектр. Свет на призму попадает от источника 1 через коллиматорную трубку, состоящую из щели 2 и конденсора (системы линз) 3, с помощью которых получают узкий пучок параллельных лучей. После преломления в призме лучи собираются линзой 5 в её фокальной плоскости, где получается изображение спектра.

На рис. 6.3 изображен общий вид прибора. Для регулировки ширины щели имеется винт 4. Рукоятка 5 с надписью «закрыто – открыто» управляет движением затвора. Весь спектр не попадает в поле зрения прибора. Поворачивая призму, можно наблюдать разные его части. Чтобы определить длину волны, спектральную линию устанавливают посередине указателя, имеющегося в окуляре 8. По-

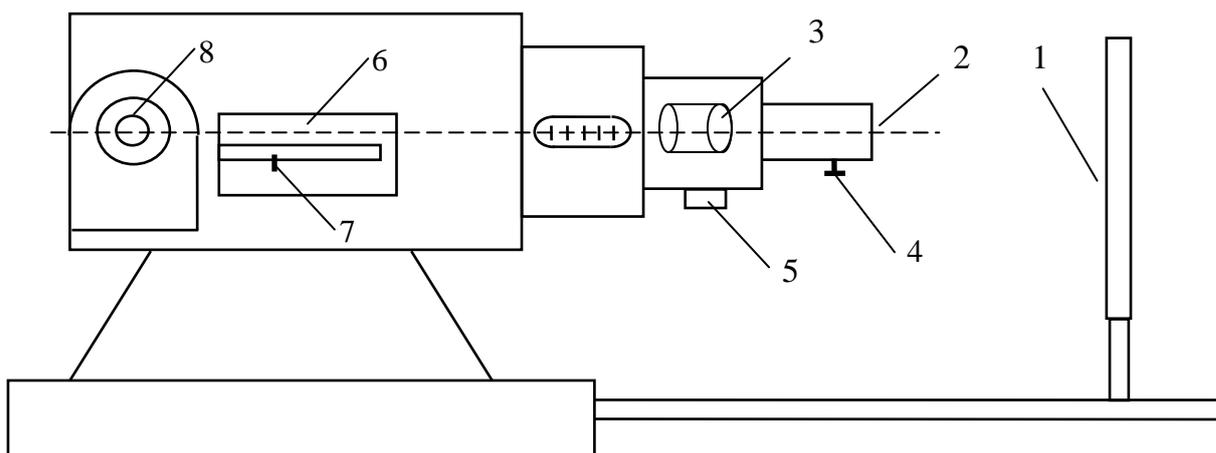


Рис. 6.3

ворот призмы осуществляется барабаном 6, на котором нанесены деления – градусы, отсчёт которых делается по указателю 7.

Выполнение работы

Задание 1. Градуировка монохроматора

Для того чтобы найти длину волны спектральной линии, монохроматор нужно сначала отградуировать, то есть установить, наблюдая спектр с линиями известной длины волны, какому делению барабана N какая длина волны λ соответствует. Для градуировки монохроматора используется лампа дневного света (ртутная лампа), для спектральных линий которой длины волн указаны в табл. 6.1.

Прежде чем приступить к градуировке, внимательно рассмотрите спектр лампы. (Опишите в отчете и дайте объяснения его характерным особенностям). Помните, что в лампе светятся и пары ртути, возбуждённые электрическим газовым разрядом, и твёрдое вещество – люминофор, нанесённый на стенки лампы. Затем приступайте к градуировке прибора. Для этого последовательно устанавливайте в поле зрения окуляра представленные в табл. 6.1 спектральные линии, записывая соответствующие деления барабана N . Каждую линию следует устанавливать не менее 2 раз (стараясь, чтобы середина линии приходилась точно на острие указателя).

Таблица 6.1

| Линии спектра ртути | λ , нм | Деления шкалы барабана | | |
|---------------------|----------------|------------------------|-------|---------------------|
| | | N_1 | N_2 | $\langle N \rangle$ |
| Оранжевая | 612,8 | | | |
| Желтая левая | 579,1 | | | |
| Желтая правая | 577,0 | | | |
| Зеленая яркая | 546,1 | | | |
| Слабая голубая | 491,6 | | | |
| Сине-фиолетовая | 435,8 | | | |

| | | | | |
|------------|-------|--|--|--|
| Фиолетовая | 404,7 | | | |
|------------|-------|--|--|--|

Задание 2. Определение длин волн спектра водорода

Подведите блок с водородной трубкой вплотную к объективу монохроматора. Включите водородную трубку. Если спектр плохо виден, обратитесь к руководителю лабораторных работ.

Внимательно изучите спектр водорода, опишите его характер. Определите деления барабана монохроматора, соответствующие трём первым линиям видимого спектра водорода. Заполните табл. 6.2 для этих трёх линий: H_α – красная линия, H_β – голубовато-зелёная и H_γ – сине-фиолетовая. Эти линии следуют по порядку друг за другом и их номера соответственно равны 3, 4, 5.

Таблица 6.2

| Линии спектра водорода | Номер линии | Деления барабана | | | Длина волны | Постоянная Ридберга $R, 10^7 \text{ м}^{-1}$ |
|------------------------|-------------|------------------|-------|---------------------|-----------------------|--|
| | m | N_1 | N_2 | $\langle N \rangle$ | $\lambda, \text{ нм}$ | |
| H_α | | | | | | |
| H_β | | | | | | |
| H_γ | | | | | | |

Замеры нужно проводить тщательно, устанавливая против указателя середину спектральной линии.

Анализ и обработка результатов измерений

1. По данным табл. 6.1 постройте график зависимости $\lambda = f(N)$. Градуировочный график $\lambda = f(N)$ строится по среднему значению $\langle N \rangle$ этих двух измерений. По оси ординат откладывают длины волн, а по оси абсцисс – деления барабана. Выбирая масштаб графика, помните, что миллиметровая бумага даёт возможность точно задать три значащие цифры. Эту возможность Вы должны использовать! Строя график, не заканчивайте кривую на последней точке, а плавно проводите её в область бóльших длин волн. Для этого, выбирая масштаб по оси ординат, проставьте запасные деления вплоть до 650–700 нм, и соответствующие им деления по оси абсцисс.

2. С помощью градуировочного графика определите длины волн излучения водорода, используя значения $\langle N \rangle$ из табл. 6.2. По этим длинам волн рассчитайте значения постоянной Ридберга. Оцените погрешность её определения по стандартной методике.

3. Зарисуйте спектр водорода, нанеся каждую линию на ось λ с соблюдением масштаба, интенсивности и цвета линии излучения.

4. Получите из формул (6.4)-(6.6) выражение для постоянной Ридберга через фундаментальные постоянные (h, e, m, c) и вычислите значение R по известным табличным значениям этих постоянных. Разумеется, точность расчёта не должна превышать ту, с которой Вы определили R из опыта (вероятно, это будут 3–4 зна-

чащие цифры). Сравните между собой экспериментальное и теоретическое значения постоянной Ридберга.

5. Начертите схему энергетических уровней для водорода и покажите переходы, в результате которых появились наблюдаемые вами линии. По полученным в задании 2 экспериментальным значениям длин волн рассчитайте энергии излучённых квантов.

6. Проставьте на схеме уровней расчётные значения их энергий, определите по ним энергии квантов и сравните их с наблюдаемыми.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. Опишите характерные особенности линейчатого и сплошного спектров. Чем излучается тот и другой?
4. Какой газ будет использован Вами для градуировки монохроматора?
5. Каков физический смысл m и n в формуле (6.4)?
6. Приведите расчётную формулу и рассчитайте энергии тех уровней, переходы между которыми Вы будете наблюдать.
7. Почему в лампе дневного света Вы видите наложение сплошного и линейчатого спектров?
8. Сформулируйте постулаты Бора. Изобразите в масштабе первые три орбиты электрона в атоме водорода. (Радиусы орбит удобно измерять в Ангстремах).
9. Как зависит полная энергия электрона в атоме водорода от номера орбиты?
10. Каково соотношение между потенциальной, кинетической и полной энергиями электрона в атоме водорода?
11. Как изменяются полная и кинетическая энергия электрона при излучении кванта?

Работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: определить коэффициенты поглощения, энергию и длину волны гамма-квантов.

Оборудование: счётчик импульсов, радиоактивный препарат, секундомер, алюминиевые пластинки.

Краткая теория

Радиоактивность – это процесс спонтанного превращения ядер одних элементов в другие ядра. Ядра, которые могут испытать такие превращения, называют радиоактивными. Установлено, что радиоактивны все химические элементы с порядковым номером, большим 82 (т.е. начиная с висмута), и многие более лёгкие элементы (проектий и технеций не имеют стабильных изотопов, а у некото-

рых элементов, таких как индий, калий или кальций, часть природных изотопов стабильны, другие же радиоактивны). При распаде ядра выбрасываются либо альфа-, либо бета-частицы. По поведению их в магнитном или в электрическом поле установили, что *альфа-лучи* представляют собой поток тяжелых положительно заряженных частиц с зарядом $2e$ (ядра атома гелия). *Бета-лучи* при естественной радиоактивности – это поток электронов. Распад ядра сопровождается также излучением фотонов или гамма-лучей.

Гамма-лучами называют электромагнитные волны весьма малой длины: $\lambda < 10^{-10}$ см и, вследствие этого, с ярко выраженными корпускулярными свойствами. Гамма-лучи испускают образовавшиеся после выброса α - или β -частицы новые ядра. Благодаря очень высокой частоте энергия кванта γ -лучей существенно выше энергии кванта видимых и даже рентгеновских лучей, вследствие чего γ -кванты обладают большей проникающей способностью по сравнению с другими видами электромагнитного излучения, хотя закон поглощения для всех одинаков.

Поглощение радиоактивного излучения веществом

Механизм поглощения при взаимодействии γ -излучения с веществом бывает различным в зависимости от энергии (частоты) проходящей волны (фотона). Гамма-кванты могут взаимодействовать с веществом различными способами:

- выбивая электроны из атомов (*фотоэффект*);
- сообщая электронам часть своей энергии при упругом столкновении (*эффект Комптона*).
- образуя электрон-позитронные пары (гамма-квант превращается в электрон и позитрон).
- поглощаясь ядром атома с испусканием последним протона или нейтрона (*ядерный фотоэффект*).

Величина коэффициента поглощения γ -квантов в веществе зависит от их энергии. Чем меньше энергия квантов, тем больше коэффициент ослабления. При малых энергиях ($h\nu < 100$ кэВ) основной вклад в поглощение вносит *фотоэффект*, то есть поглощение γ -кванта одним из электронов в атоме, причём энергия кванта преобразуется в основном в кинетическую энергию электрона, вылетающего за пределы атома.

Если энергия γ -квантов лежит в пределах ($10^2 \dots 10^3$) кэВ, то наиболее существенную долю в их поглощение вносит *эффект Комптона*, то есть рассеяние фотонов на свободных или на слабо связанных в атоме электронах. При этом уменьшается энергия квантов и изменяется направление их движения.

При энергии кванта $h\nu > 1,02$ МэВ $= 2m_e c^2$ (m_e – масса покоя электрона) становится возможным процесс образования *электрон-позитронных пар* в электрических полях ядер. Вероятность этого процесса пропорциональна энергии фотона и при энергии $h\nu > 10$ МэВ основным процессом поглощения γ -лучей в любом веществе оказывается образование пар.

Если энергия фотона $E_\gamma \geq 5 \text{ МэВ}$, то в механизме поглощения γ -лучей преобладает взаимодействие с ядром (*ядерный фотоэффект*) и образование пар электрон – позитрон.

Энергию любого монохроматического излучения можно представить как произведение числа квантов N на энергию $\varepsilon = h\nu$ одного кванта: $W = N h\nu$. При прохождении γ -лучей через вещество происходит ослабление их интенсивности, то есть уменьшение числа квантов.

Обозначим через n число γ -квантов, дошедших за единицу времени до слоя dx (рис. 7.1); после прохождения слоя dx число квантов вследствие поглощения сократится на dn . Убыль числа квантов будет пропорционально числу n упавших квантов и толщине слоя:

$$dn = -\mu n dx, \quad (7.1)$$

где μ – коэффициент пропорциональности, называемый *линейным коэффициентом поглощения* или ослабления. Из формулы (7.1) следует, что линейный коэффициент поглощения

$$\mu = \frac{|dn|}{n dx}, \quad (7.2)$$

то есть он численно равен относительно-му изменению числа фотонов при прохождении слоя вещества единичной толщины. Величина μ зависит от свойств вещества и от энергии квантов излучения. Разделяя переменные в уравнении (6.1) и интегрируя его по x от 0 до b и по n от n_0 до n , получаем

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\mu b, \quad (7.3)$$

где n – число γ -квантов, прошедших преграду толщиной b ; n_0 – число γ -квантов, упавших на вещество (см. рис. 7.1).

Равенство (7.3) несложно привести к виду $y = kx + c$, где $y = \ln n$, $x = b$. Это даёт возможность рассчитать μ по графику зависимости $\ln n$ (b). Прежде, чем приступить к работе, начертите примерный вид этого графика, подумайте, как найти μ . Потенцирование этого уравнения даёт закон поглощения любых электромагнитных волн (получите его!), независимо от их частоты. Разница (и весьма значительная!) будет лишь в величине μ .

Линейный коэффициент ослабления в одной и той же среде монотонно уменьшается с увеличением энергии (частоты). Вместе с тем, величина μ зависит и от среды (вещества), в которой распространяется излучение: чем больше плотность вещества, тем больше коэффициент поглощения, поэтому наряду с μ вво-

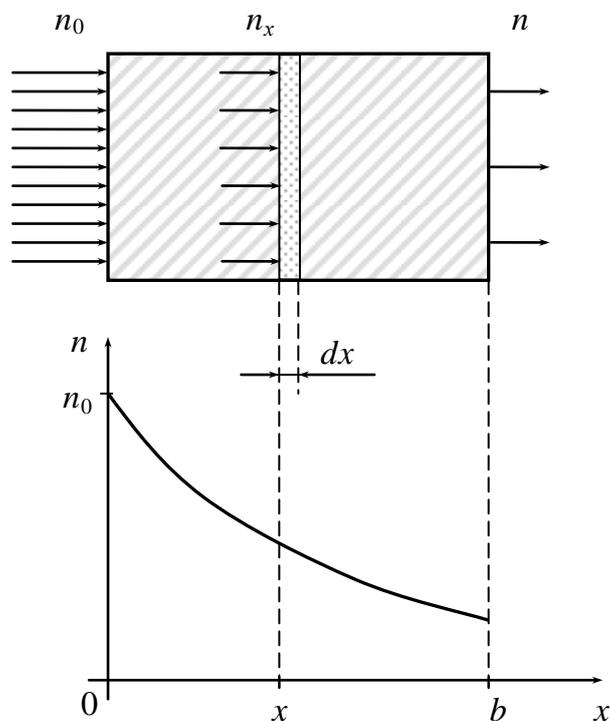


Рис. 7.1

дят массовый коэффициент поглощения $\mu_m = \mu/\rho$. Для оценки поглощательных свойств материала пользуются также понятием слоя половинного ослабления

$$b_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (7.4)$$

Как следует из названия данной характеристики, слой половинного ослабления соответствует такой толщине материала, которая в два раза ослабляет проходящее через него радиоактивное излучение.

Описание установки

Для регистрации гамма-лучей и бета-частиц применяются счётчики Гейгера – Мюллера.

Рабочий объем счётчика – газоразрядный промежуток с сильно неоднородным электрическим полем. Чаще всего применяют коаксиальные цилиндрические электроды: внешний цилиндр – катод; тонкая нить, натянутая вдоль его оси – анод (рис. 7.2). Электроды заключены в герметичный резервуар, наполненный газом до давления ≈ 100 -200 мм рт.ст. К электродам прикладывается напряжение в несколько сотен вольт.

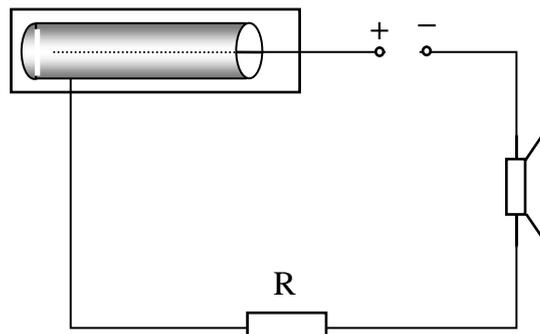


Рис. 7.2

Попав в пространство между электродами β -частицы или кванты γ -лучей, сталкиваясь с атомами газа ионизируют их (выбивают из них электроны). Образующиеся вследствие ионизации свободные электроны, начинают двигаться под действием электрического поля с ускорением к нити. Вблизи нити напряженность электрического поля велика, и электроны ускоряются настолько, что начинают, в свою очередь, ионизировать газ.

В связи с этим, по мере приближения к нити число электронов лавинообразно нарастает. Возникает импульс тока – коронный разряд, распространяющийся вдоль нити. Для гашения этого разряда в цепь включают большое сопротивление $R \approx 100$ МОм (рис. 7.2).

Электрические импульсы, возникающие при попадании частиц в счётчик, во внешней цепи усиливаются и регистрируются. При выполнении данной работы используется установка типа "ГИСС", которая является переносным лабораторным радиометром. Она обеспечивает регистрацию импульсов тока, поступающих от газового счётчика. Эти импульсы усиливаются и приводят в действие электромеханический счётчик. Установка работает от сети переменного тока.

Выполнение измерений

Задание 1. Определение радиоактивного фона

Приступая к работе, необходимо знать, что источником радиоактивного излучения может служить окружающая нас среда: воздух, космические лучи, поверх-

ность Земли – на ней всюду имеются радиоактивные атомы. Поток ионизирующего излучения зависит от географического положения, наличия солнечного излучения, от загрязненности атмосферы, залегания руд. Все это создает так называемый радиоактивный фон.

Проверьте, нет ли возле счётчика Гейгера радиоактивного препарата. Включите прибор, и когда он прогреется (минут через 5), приступите к счёту числа импульсов за 3 минуты, замеряя время по секундомеру. Данные измерений запишите в табл. 7.1. Всего сделайте два измерения фона: одно – *до измерений* с радиоактивным препаратом, второе – *после измерений* с препаратом.

Таблица 7.1

| Время измерения | Общее число импульсов | Число импульсов в минуту | Среднее значение фона |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| t , мин | N_{ϕ} | n_{ϕ} | $\langle n_{\phi} \rangle$ |
| 3 | | | |
| 3 | | | |

Задание 2. Определение линейного коэффициента поглощения

Для проведения измерений установите контейнер с радиоактивным препаратом перед счётчиком, сначала без преграды между ними, и определите интенсивность излучения радиоактивного препарата (n_0). Затем, разделяя счётчик и препарат пластинкой из рекомендуемого материала, определяйте число γ -квантов n , прошедших сквозь преграду. Для того, чтобы построить график, следует взять не менее пяти различных значений b и определить соответствующие значения n . Данные занесите в табл. 7.2.

Примечание. Для обеспечения достаточной точности измерений число импульсов N за время измерения t должно быть порядка 1000. Подумайте, что делать с фоном!

Таблица 7.2

| № п.п. | b , | t , | N | N_1 | n | $\ln n$ |
|--------|-------|-------|-----|-------|-----|---------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Здесь b — толщина преграды; N – число зарегистрированных импульсов за время измерения t ; $N_1 = N/t$ – число импульсов в минуту; n – число импульсов *от радиоактивного препарата* (без фона), прошедших через преграду за минуту.

Анализ и обработка результатов измерений

1. Рассчитайте значения N_1 , n , $\ln n$ и заполните табл. 7.2.

1. По данным табл. 7.2 постройте график зависимости $\ln(n)$ от b и определите по нему линейный коэффициент ослабления μ для данного излучения, а затем и массовый коэффициент ослабления μ_m этого излучения.

2. Вычислите толщину $b_{1/2}$ слоя половинного ослабления и проверьте, соответствуют ли её значение данным в табл. 7.2. Напишите это в выводе.

3. По найденному в *задании 2* линейному коэффициенту поглощения определите энергию γ -квантов при помощи графика зависимости коэффициента поглощения от энергии γ -квантов. Этот график Вы можете увидеть в Приложении II или на стенде в лаборатории.

3. Определите частоту и длину волны гамма-излучения и сравните их с соответствующими значениями для видимого света.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. Объясните устройство и принцип действия счётчика Гейгера-Мюллера.
4. Выведите закон, определяющий поглощение излучения в веществе, потенцируя выражение (7.3).
5. Сравните частоту γ -лучей с частотой рентгеновских и видимых лучей. Рассчитайте энергию квантов этих типов излучения.
6. Какова размерность линейного и массового коэффициентов ослабления?
7. Объясните физическую природу и назовите источники гамма-излучения.
8. Какие процессы происходят в веществе при поглощении гамма-лучей с различной энергией?
9. Как зависит линейный коэффициент ослабления от частоты гамма-излучения? От плотности вещества?

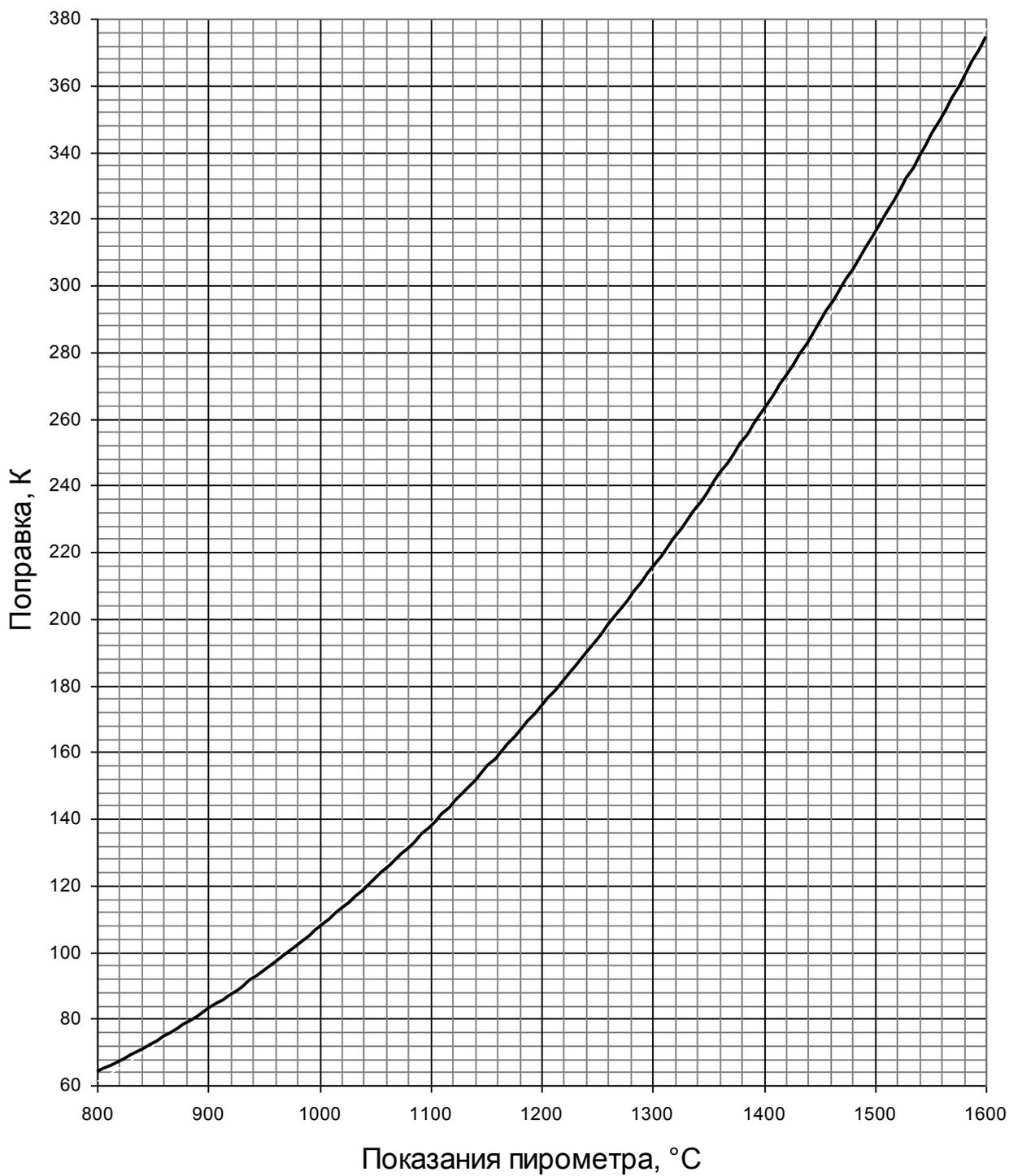
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982. – Т. 2.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982. – Т. 3.
3. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.В. Детлаф. – М.: Наука, 1988.
4. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976.
5. Кортнев, А.В. Практикум по физике / А.В. Кортнев, Ю.В. Рублев, А.Н. Куценко. – М.: Высшая школа, 1965.

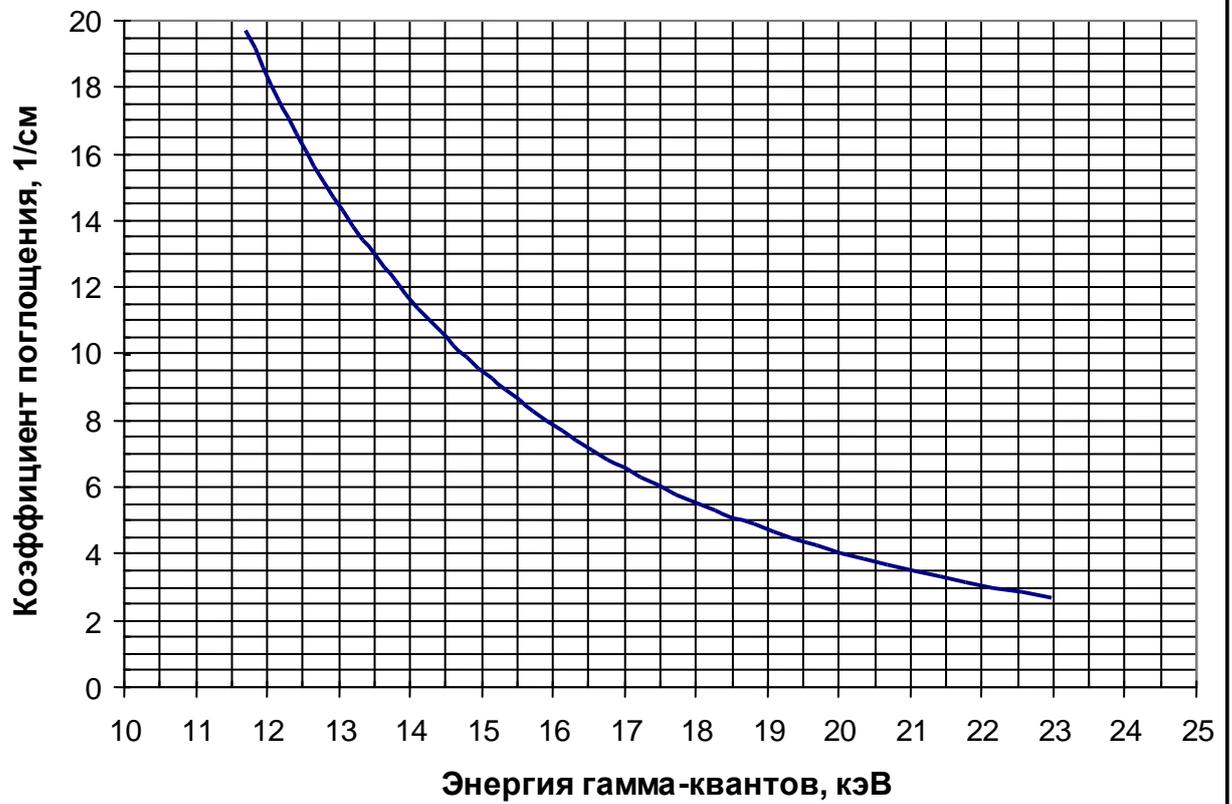
ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | |
| Работа 1. Определение дисперсии стекла оптической линзы..... | 3 |
| Работа 2. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решётки..... | 7 |
| Работа 3. Изучение законов внешнего фотоэффекта..... | 11 |
| Работа 4. Определение коэффициента черноты вольфрама..... | 15 |
| Работа 5. Изучение поляризации света..... | 19 |
| Работа 6. Градуировка монохроматора и определение постоянной Ридберга..... | 25 |
| Работа 7. Определение характеристик радиоактивного излучения..... | 28 |
| Библиографический список..... | |
| Приложения..... | |

**Поправки к показаниям яркостного пирометра при
измерении температуры вольфрама**



Зависимость линейного коэффициента поглощения для алюминия от энергии гамма-квантов



Фундаментальные физические константы

| Название | Обозначение | Величина |
|--|-------------------|---|
| Гравитационная постоянная | G | $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ |
| Скорость света в вакууме | c | $3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ |
| Магнитная постоянная | μ_0 | $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ |
| Электрическая постоянная | ε_0 | $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ |
| Постоянная Планка | h | $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ |
| Постоянная Планка ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$) | \hbar | $1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ |
| Масса покоя электрона | m_e | $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ |
| Масса покоя протона | m_p | $1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Масса покоя нейтрона | m_n | $1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Отношение массы протона к массе электрона | $\frac{m_p}{m_n}$ | 1836 |
| Элементарный заряд | e | $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ |
| Отношение заряда электрона к его массе | $\frac{e}{m_e}$ | $1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ |
| Атомная единица массы | 1 а.е.м. | $1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Постоянная Авогадро | N_A | $6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ |
| Универсальная газовая постоянная | R | $8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ |
| Постоянная Больцмана | k | $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ |
| Постоянная Стефана – Больцмана | σ | $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ |
| Постоянная Ридберга | R | $1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ |

Приложение IV

Показатели преломления некоторых веществ

| Вещество | Показатель преломления | Вещество | Показатель преломления |
|----------|------------------------|------------------|------------------------|
| Алмаз | 2,42 | Мыльная плёнка | 1,33 |
| Вода | 1,33 | Скипидар | 1,48 |
| Лёд | 1,31 | Стекло (обычное) | 1,5 |

Приложение V

Работа выхода электронов из металла

| Металл | Работа выхода, эВ | Металл | Работа выхода, эВ |
|----------|-------------------|--------|-------------------|
| Вольфрам | 4,5 | Литий | 2,4 |
| Платина | 5,3 | Натрий | 2,3 |
| Серебро | 4,74 | Калий | 2,0 |
| Цезий | 1,9 | Цинк | 4,0 |