

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Цель работы: познакомиться с дифракцией света, полученной с помощью дифракционной решётки, определить длины световых волн основных цветов.

Оборудование: оптическая скамья, источник белого света, линейка со щелью, дифракционная решётка.

Краткая теория

Напомним некоторые элементарные сведения из оптики – раздела физики, в котором изучаются свойства и действия света. Светом называют электромагнитное излучение, испускаемое нагретым или находящимся в возбуждённом состоянии веществом. Под светом в широком смысле понимают не только *видимый свет*, который воспринимается человеческим глазом и вызывает зрительные ощущения, но и примыкающие к нему области электромагнитного спектра.

Электромагнитные колебания распространяются в вакууме с наибольшей в природе скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (300 тысяч километров в секунду), образуя *электромагнитные волны*. Расстояние, которое проходят электромагнитные колебания за один период T , называют *длиной волны*

$$\lambda = cT. \quad (1)$$

Видимый свет – это электромагнитное излучение с длинами волн приблизительно от 400 до 760 нм (от фиолетового до красного) ($1 \text{ нм} = 10^{-9}$ м; нм – обозначение нанометра – единицы измерения малых длин). Если расположить области электромагнитного спектра в порядке увеличения длины волны (рис. 1), то слева от видимого диапазона будет область *ультрафиолетового* (УФ) излучения ($\lambda < 380$ нм), а справа – область *инфракрасного* (ИК) излучения ($\lambda > 760$ нм).



Рис. 1.1

Дифракцией называют явление огибания волнами препятствий. Свет, как и любая волна, испытывает дифракцию при встрече препятствия, соразмерного длине волны. Препятствием может служить экран с отверстием любой формы – щелью, круглым отверстием. Им может быть и небольшой предмет, не перекрывающий полностью пучок света, а лишь частично его закрывающий. В любом случае появляющаяся картина будет представлять чередование максимумов и минимумов, повторяющих форму препятствия. В случае щели это будут чередующиеся тёмные и светлые полосы, для круглого отверстия – окружности.

Дифракционный спектр в этой работе вы будете получать с помощью *дифракционной решётки*. Она представляет собой совокупность узких параллельных щелей, пропускающих свет, разделённых непрозрачными полосами. Каждая щель усиливает действие соседней, и картина получается существенно более яркой, чем от одной щели. Основной характеристикой дифракционной решётки является *постоянная решётки* d – суммарная ширина прозрачной и непрозрачной полоски (рис.2.1). Эту величину называют также *периодом* дифракционной решётки.

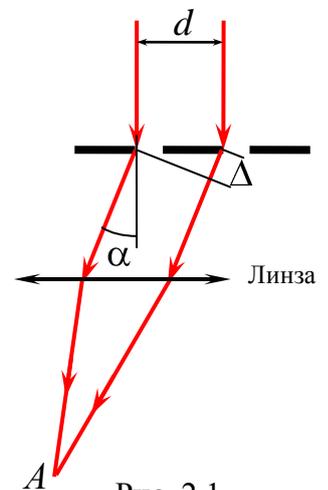


Рис. 2.1

На рисунке из всех лучей, упавших на решётку, выделены два луча, прошедшие через неё на расстоянии d друг от друга. Эти лучи испытали дифракцию, т.е. отклонились от прямого пути на угол α . Поставленная на их пути линза собрала их в своём фокусе, где они наложились друг на друга. Результат наложения определяется той разностью хода Δ , которую они приобрели из-за отклонения от прямого пути. В точке A экрана будет наблюдаться *максимум* для длины волны λ , если разность хода этих волн кратна целому числу длин волн:

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

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – целое число, называемое **порядком спектра**.

Как следует из рис. 2.1, разность хода Δ можно выразить через период d дифракционной решётки:

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

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

$$d \sin \alpha_k = k\lambda; \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (2.3)$$

Из этого равенства следует, что угол отклонения всех максимумов (кроме нулевого, для которого $k = 0$) зависит от длины волны: чем больше λ , тем на больший угол отклоняется волна. Поскольку волны разной длины (а, значит, и разного цвета!) отклоняются на разные углы, то белый свет, упавший на решётку, разлагается в спектр. Максимум нулевого порядка будет белым, потому что при $k = 0$ условие максимумов выполняется для всех длин волн.

В полученное соотношение (2.3) вошла интересующая нас величина – длина световой волны. Она выражена через величины, которые можно определить на опыте. О том, как это сделать, речь пойдёт ниже. Сейчас же мы заметим, что из формулы дифракционной решётки также можно получить условие наблюдения дифракции, о котором шла речь выше: ширина прозрачных и непрозрачных полос должна быть соизмерна длине волны, иначе дифракция наблюдаться не будет. Действительно, при $d \gg \lambda$ синус угла α и, следовательно, угол α в (2.3) будут стремиться к нулю, и дифракционные максимумы и минимумы будут накладываться друг на друга, создавая равномерную освещённость вместо полосатой картины.

Описание установки

Схема хода лучей в лабораторной установке для получения дифракционной картины и определения длины световой волны изображена на рис 2.2.

Пучок белого света от лампы накаливания падает на узкую щель. Она нужна для того, что-

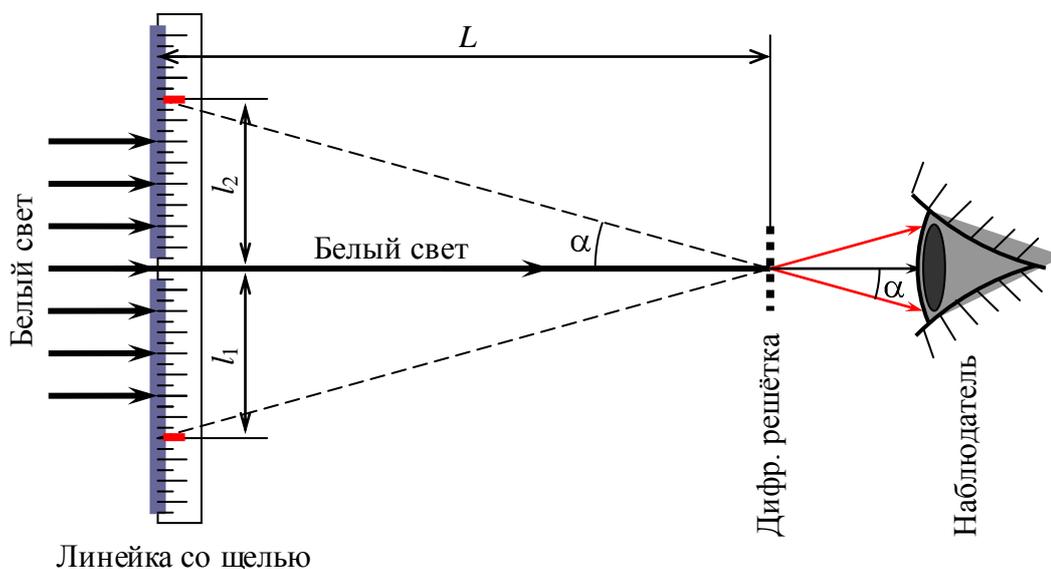


Рис. 2.2

бы вырезать из него лучи, идущие от небольшого участка источника, когерентные друг другу. В случае если источником будет лазер, щель не нужна: атомы лазера светятся согласовано, свет от него когерентен.

Падая на решётку, свет частично проходит через неё прямо, частично отклоняется – дифрагирует. На рисунке показан прямой луч и два луча, отклонённых на угол α симметрично вверх и вниз. Стрелки показывают, что лучи попали в глаз. Обратные продолжения лучей (пунктирные прямые) дают возможность найти те точки на линейке, куда глаз проецирует эти лучи. Вы, естественно, понимаете, что в указанных направлениях хрусталик глаза собрал все лучи, отклонённые на один и тот же угол α . Если для этих лучей выполняется условие максимума (2.3), то все лучи, попадающие в глаз наблюдателя под этим углом, накладываясь, дадут на сетчатке глаза яркий максимум, который наблюдатель воспринимает как яркую полосу, расположенную в одной плоскости со щелью на расстоянии l_1 или l_2 по обе стороны от щели (см. рис. 2.2).

Расстояния l_1 и l_2 можно измерить по линейке, в которой прорезана щель, а расстояние L между щелью и дифракционной решёткой – по другой линейке, расположенной параллельно лучу. По измеренным длинам можно найти синус угла отклонения, который при малых углах ($\alpha < 10^\circ$) практически равен тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\langle l \rangle}{L}, \quad (2.5)$$

и при $l < 0,2L$ длину волны можно вычислять по формуле

$$\lambda \approx \frac{d \langle l \rangle}{kL}. \quad (2.6)$$

Здесь $\langle l \rangle = (l_1 + l_2)/2$ – среднее значение отклонений l_1 и l_2 , измеренных для соответствующего цвета.

Выполнение работы

1. Запишите в черновик значение периода d дифракционной решётки.
2. Определите цену деления линеек и запишите в черновик.
3. Установите дифракционную решётку на расстоянии L от щели (по указанию преподавателя). Запишите значение L в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Цвет	k	L , мм	l_1 , мм	l_2 , мм	$\langle l \rangle$, мм	λ , нм
1	Красный						
2	Зеленый						
3	Фиолетовый						
4	Красный						
5	Зеленый						
6	Фиолетовый						
7	Красный						
8	Зеленый						
9	Фиолетовый						

4. Включите осветитель.
5. Глядя сквозь решётку на щель, измерьте отклонения l_1 и l_2 в спектре первого порядка ($k = 1$) для каждого из трёх цветов, запишите в табл. 2.1.
6. Повторите измерения по п. 5, ещё для двух расстояний L между решёткой и щелью (значения L задаются преподавателем или лаборантом). Всего получится по 3 измерения для каждого цвета. *Обратите внимание:* в ячейках для L и k должно стоять только одно число, общее для трёх цветов!
7. Выключите все приборы.

8. Вычислите длину волны в метрах для любой строчки в таблице по Вашему выбору.
9. Представьте результаты измерений на подпись преподавателю. Получив подтверждающую подпись, наведите порядок на рабочем месте.

Анализ и обработка результатов измерений

1. Дома вычислите и запишите средние значения отклонений $\langle I \rangle$ в каждой строчке таблицы.
2. По формуле (5) рассчитайте значения длины волны λ для каждой строки и запишите в табл. 1.

ПРИМЕЧАНИЕ: расчёты вести только в системе СИ по правилам приближённых вычислений, округляя расчётные значения до **трёх значащих цифр**, и убирая нули в **порядок** числа.

3. Выполните статистическую обработку результатов по 4-м значениям λ для каждого цвета в виде 3 стандартных **таблиц обработки результатов измерений** (прил. 1, табл. П1.2).

4. Сравните полученные средние значения с табличными значениями длин волн оптического диапазона (прил. 2, табл. П2.1).

5. Сформулируйте и напишите вывод, обобщающий полученные Вами результаты измерений, расчётов и сравнений.

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? Для чего она используется?
5. Почему белый свет, пройдя через дифракционную решётку, образует спектр? В каком порядке располагаются цвета в этом спектре?
6. В каких пределах лежат длины волн видимого света? Как называют излучение, длины волн которого меньше (больше), чем у видимого света?
7. Выведите и объясните расчётную формулу для вычисления длины волны.

Работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: Снять вольтамперные характеристики фотоэлемента. Определить скорость выбитых электронов и их количество, а также зависимость этих величин от расстояния между лампой и фотоэлементом.

Оборудование: оптическая скамья с источником света, набором светофильтров и фотоэлементом, измерительный модуль с блоком питания осветителя.

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 такого металла светом 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 на-

пряжения. Для измерения тока в этом простейшем случае достаточна 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. График зависимости силы тока от напряжения на фотоэлементе, изображённый на рис. 3.2, называют *вольтамперной характеристикой фотоэлемента*. Сила тока будет увеличиваться 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 . По величине этого тока можно вычислить общее число электронов, выбитых квантами света.

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

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

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 освещённости 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 (длиной волны).

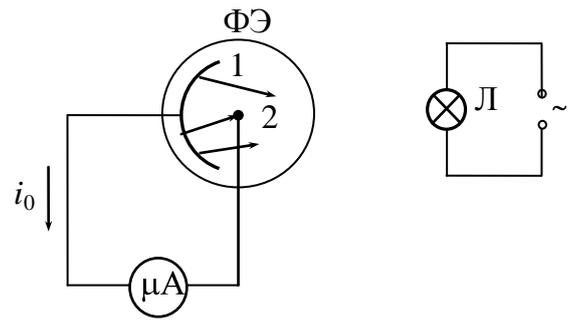


Рис. 3.1

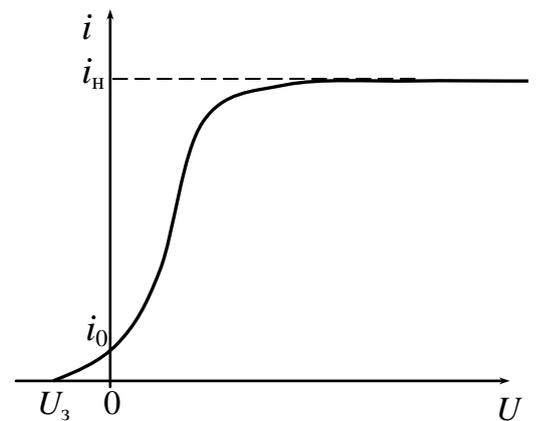


Рис. 3.2

3. Для каждого фотокатода существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота электромагнитного излучения ν_0 (максимальная длина волны $\lambda_{\text{кр}} = c/\nu_0$), при которой фотоэффект ещё возможен.

Обсудим закон сохранения энергии в применении к явлению фотоэффекта. 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

Согласно классическим волновым представлениям, энергия световой волны равна сумме энергий электрического и магнитного полей, комбинацией которых и является световая волна.

Увеличение количества световой энергии, вызванное, например, приближением источника света, должно привести к увеличению скорости выбитых электронов, так как работа выхода A является постоянной для данного катода 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.

НО! Из второй закономерности фотоэффекта следует, что *скорость электронов зависит не от интенсивности, а от частоты света* – налицо первое противоречие.

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, волновые представления о свете не позволяют полностью объяснить закономерности фотоэффекта, теория вступает в противоречие с экспериментом.

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

$$W = N h\nu, \quad (3.2)$$

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 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*:

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}. \quad (3.3)$$

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 $i_{\text{н}}$ должно быть прямо пропорционально числу N всех электронов, выбитых светом из катода за одну секунду:

$$i_{\text{н}} = \frac{eN}{t}. \quad (3.4)$$

Из уравнения Эйнштейна (3.3) 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:

$$h\nu_0 = A, \quad (3.5)$$

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 источника света, фотоэлемента и поворотной шайбы с набором светофильтров, установленных на оптической скамье (рис. 3.1). Лабораторная установка имеет семь светофильтров – по числу основных цветов спектра. На каждом свето фильтре проставлена та длина волны, которую он пропускает. Для выполнения измерений в состав лабораторной установки входит измерительный модуль, обеспечивающий подачу и измерение напряжения на фотоэлементе в пределах от -5 до $+20$ В, измерение силы тока от 0 до 9,99 мкА, а также электропитание источника света – галогеновой лампы.

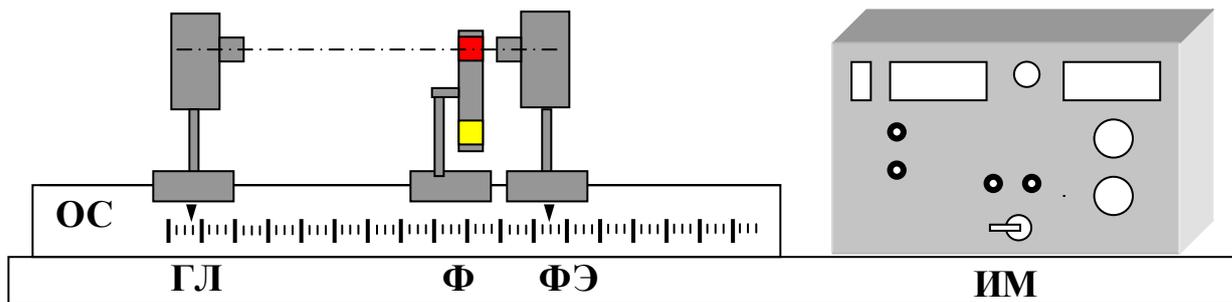


Рис. 3.1. ГЛ – галогеновая лампа; Ф – светофильтры; ФЭ – фотоэлемент; ОС – оптическая скамья; ИМ – измерительный модуль

Фототок измеряют цифровым микроамперметром. Напряжение на фотоэлементе может изменяться вращением двух ручек «Грубо», «Плавно» в правой части передней панели измерительного модуля. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжений служит 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. Измерьте расстояние l_1 между лампой и фотоэлементом и запишите в табл. 3.1.

Замеры фототока нужно сделать при **одном из из 7 цветов** обоймы светофильтров (по указанию преподавателя). Запишите цвет и длину волны в табл. 3.1. Устанавливая значения напряжения от 0 до 18 В, проведите измерения силы фототока и занесите результаты в табл. 3.1.

Цвет светофильтра		$\lambda = \dots$ нм										Таблица 3.1
Напряжение U , В		0	1	2	3	5	8	11	14	17	18	U_3 , В
i , мкА	при $l_1 = \dots$											
	при $l_2 = \dots$											

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

Увеличьте расстояние l и повторите измерения фототока и запирающего напряжения, записывая результаты в табл. 3.1.

Выключите все приборы.

Представьте результаты измерений на подпись преподавателю. Получив подтверждающую подпись, наведите порядок на рабочем месте.

Анализ и обработка результатов измерений

По данным измерений, занесённым в табл. 3.1,

- постройте график зависимости силы фототока от напряжения на фотоэлементе $I(U)$ (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).
- определите количество электронов, выбиваемых светом из катода за одну секунду при установленных расстояниях (см. формулу (3.4)).
- Сделайте вывод о зависимости числа выбитых электронов, их энергии и скорости от расстояния. Укажите причины таких зависимостей.
- Используя значение длины волны, при которой проводились измерения, и уравнение Эйнштейна (3.3), определите энергию фотонов и работу выхода электронов из катода фотоэлемента.

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 (3.2), приведёт к увеличению числа выбитых электронов? Изменится ли при этом фототок?
9. Запишите уравнение (3.3). 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. Какую из наблюдаемых Вами закономерностей можно объяснить, только используя квантовые представления о свете?

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 теплового 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*

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

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. Фактически поток излучения равен мощности, которую теряет тело вследствие излучения. Чтобы температура излучающего тела оставалась постоянной, нужно подводить к нему мощность P , равную потоку излучения: $P = \Phi$. При нарушении этого равенства тело будет либо остывать, либо нагреваться.

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:

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

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, как и излучают: 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 которого меньше единицы. Если поглощённый поток равен падающему на тело потоку для всех длин волн, то тело называют абсолютно чёрным. 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).

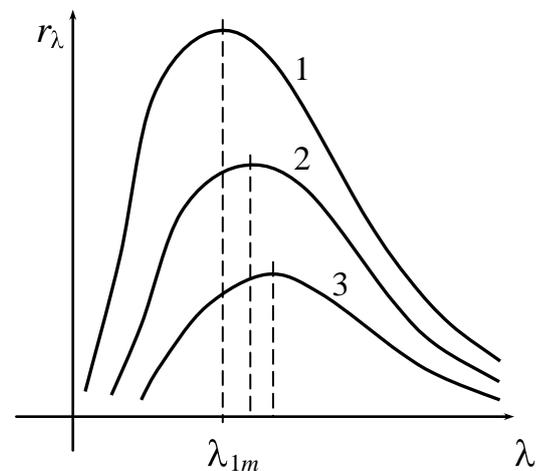


Рис. 4.1

Опыт показывает: чем больше поглощательная способность тела, тем лучше оно и 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.

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.

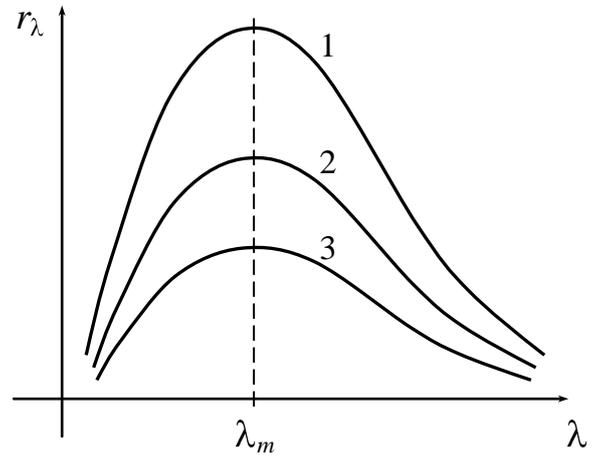


Рис. 4.2

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 P , 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_3 через мощность тока и площадь спирали лампочки. Проверьте себя, сравнивая размерности r_λ , R_3 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 прово-

лочный 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 единственным возможным в случае, когда температура объекта высока и термометр (либо термометр) её не выдерживает, или когда объект недостижим (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 ($\lambda \cong 660 \text{ нм}$) 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 фоне излучающего тела становится "невидимой" (рис. 4.4, а). Чем выше яркость тела, тем больший ток нужно устанавливать в пирометре. По шкале прибора, измеряющего этот ток, при соответствующей градуировке шкалы можно определить температуру тела.

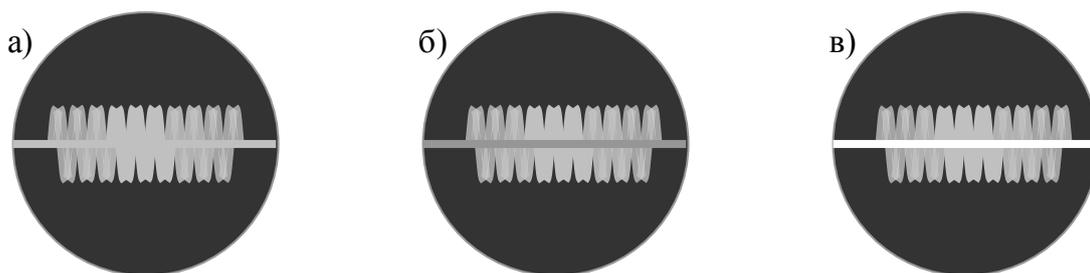


Рис. 4.4

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 2–3 раза, усредняя затем результат.

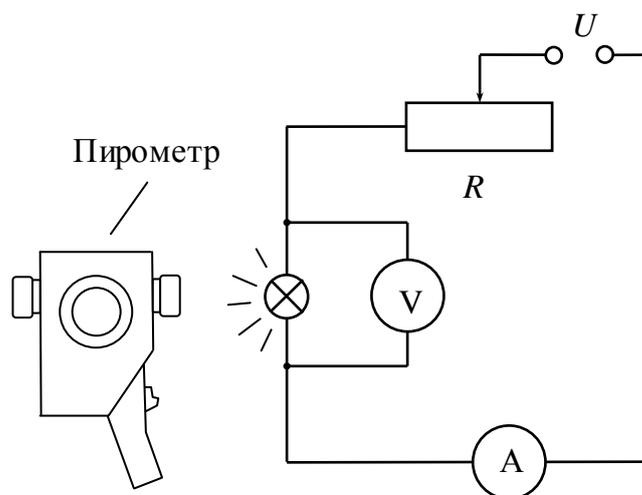


Рис. 4.3

Выполнение измерений

Произведите измерения в соответствии с подробной инструкцией, имеющейся на рабочем месте. Измерение температуры нити следует проводить не менее двух раз (t_1 и t_2 в табл. 4.1) 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
1									
2									
3									
...									
...									

Выключите все приборы.

Представьте результаты измерений на подпись преподавателю. Получив подтверждающую подпись, разберите электрическую схему, наведите порядок на рабочем месте.

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, и определите температуры $\langle t \rangle + \Delta T$ с учётом поправок в градусах Цельсия. Выразите 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). Прологарифмировав закон Стефана – Больцмана (4.8) с учётом (4.2), можно показать, что зависимость $\ln P$ от $\ln T$ будет линейной функцией, а график этой зависимости – прямой линией с угловым коэффициентом, равным показателю степени при температуре: $\ln P = \ln(a\sigma S) + 4 \cdot \ln T$.

Таблица 4.2

№ п.п.	$P, Вт$	$T, К$	$\ln P$	$\ln T$

6. Постройте график зависимости $\ln P(\ln T)$ и определите угловой коэффициент. Сравните его с показателем степени при T в законе Стефана – Больцмана.

7. Сформулируйте развёрнутый вывод о проделанной работе и полученных результатах.

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.

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 (протий и технеций не имеют стабильных изотопов, а у некоторых 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 гамма-излучением

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 ($\nu = c/\lambda$) энергия γ -фотонов существенно выше энергии квантов видимого электромагнитного излучения и даже рентгеновских лучей, вследствие чего γ -кванты обладают значительно большей проникающей способностью по сравнению с другими видами электромагнитного излучения, то есть способны проходить сквозь любое вещество.

Поглощение радиоактивного излучения веществом

При прохождении электромагнитного излучения через вещество γ -лучи взаимодействуют с атомами вещества, вследствие чего часть фотонов поглощается. *Механизм поглощения* при взаимодействии γ -излучения с веществом зависит от энергии (частоты) проходящей волны (фотона). В зависимости от своей энергии γ -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 (γ -квант превращается в электрон $-e$ и позитрон $+e$).
- поглощаясь ядром атома с испусканием последнего 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 $h\nu > 1,02 \text{ МэВ} = 2m_e c^2$ (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 $h\nu > 10 \text{ МэВ}$ основным процессом поглощения γ -лучей в любом веществе оказывается образование электрон-позитронных 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: $W = Nh\nu$. 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*. Из формулы (7.1) следует, что линейный коэффициент поглощения

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

то есть он численно равен относительному изменению числа фотонов при прохождении слоя вещества единичной толщины. Как уже указывалось выше, величина μ зависит от энергии квантов излучения, а также от свойств вещества. Разделяя переменные в уравнении (7.1) и интегрируя его по x от 0 до b и по n от n_0 до n , получаем

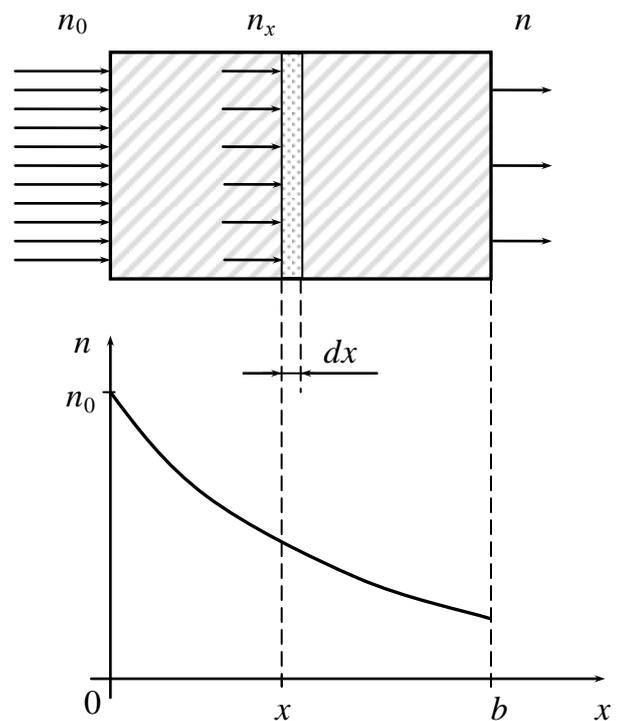


Рис. 7.1

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

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 $y = \ln n$, $x = b$, и $c = \ln n_0$. Это даёт возможность рассчитать μ по графику зависимости $\ln n$ от толщины преграды b . Прежде, чем приступить к работе, начертите примерный вид этого графика, подумайте, как найти μ . Потен-

цирование 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 вводят массовый коэффициент поглощения

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (7.4)$$

где ρ – плотность вещества.

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 ослабляет проходящее сквозь него радиоактивное излучение в два раза.

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, а 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.

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 с ускорением двигаться к нити под действием электрического поля. 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 пространство счётчика, во внешней цепи усиливаются и регистрируются. При выполнении данной работы используется установка типа "ТИСС", 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.

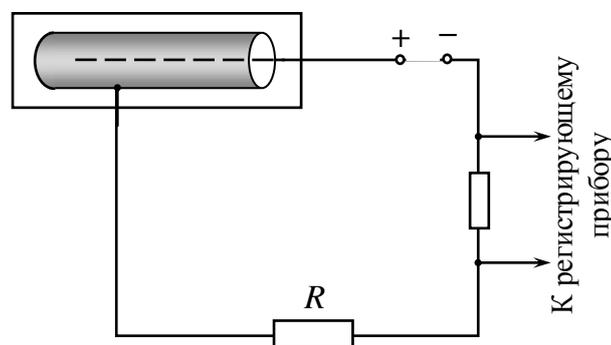


Рис. 7.2

Выполнение измерений

Задание 1. Определение радиоактивного фона

Приступая к работе, необходимо знать, что источником радиоактивного излучения может служить окружающая нас среда: воздух, космические лучи, поверхность 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	$N_{\text{ф}}$	$n_{\text{ф}}$	$\langle n_{\text{ф}} \rangle$
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 не менее 500. Подумайте, что делать с фоном!

Таблица 7.2

№ п.п.	b , мм	t , с	N	N_1 , мин ⁻¹	$n = N_1 - \langle n_{\text{ф}} \rangle$, мин ⁻¹	$\ln n$

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 1 минуту.

Выключите все приборы.

Представьте результаты измерений на подпись преподавателю. Получив подтверждающую подпись, разберите электрическую схему, наведите порядок на рабочем месте.

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 поглощения 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 пункте 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.

4. По найденной из графика энергии квантов определите частоту и длину волны гамма-излучения и сравните их с соответствующими значениями для видимого света.

5. Сформулируйте развёрнутый вывод о проделанной работе и о полученных результатах.

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. Объясните физическую природу и назовите источники гамма-излучения.
5. Выведите закон, определяющий поглощение излучения в веществе, потенцируя выражение (7.3).
6. Сравните частоту γ -лучей с частотой рентгеновских и видимых лучей. Рассчитайте энергию квантов этих типов излучения.
7. Какова размерность линейного и массового коэффициентов ослабления?
8. Какие процессы происходят в веществе при поглощении гамма-лучей с различной энергией?
9. Как зависит линейный коэффициент поглощения от частоты гамма-излучения? От плотности вещества?