

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Севастопольский государственный университет»

**ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ
«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ОПТИКА»**

Методические указания
к лабораторным работам по дисциплине «Физика»
для студентов технических направлений подготовки
и специальностей очной формы обучения

Севастополь
СевГУ
2015

СОДЕРЖАНИЕ

П р е д и с л о в и е	5
<i>Лабораторная работа 1.</i>	
Изучение электростатического поля методом моделирования	6
<i>Лабораторная работа 2.</i>	
Определение емкости конденсатора с помощью моста Сотти	14
<i>Лабораторная работа 3.</i>	
Изучение электроизмерительных приборов. Измерение мощности электролампы	18
<i>Лабораторная работа 4.</i>	
Изучение электронного осциллографа	34
<i>Лабораторная работа 5.</i>	
Снятие градуировочной кривой термопары методом компенсации	42
<i>Лабораторная работа 6.</i>	
Градуировка термопары с помощью вольтметра	46
<i>Лабораторная работа 7.</i>	
Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли	49
<i>Лабораторная работа 8.</i>	
Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона	54
<i>Лабораторная работа 9.</i>	
Исследование эффекта Холла в полупроводниках	60
<i>Лабораторная работа 10.</i>	
Исследование магнитных свойств ферромагнетиков	66
<i>Лабораторная работа 11.</i>	
Определение индуктивности катушки и проверка закона Ома для электрической цепи переменного тока	73
<i>Лабораторная работа 12.</i>	
Изучение переходных процессов при замыкании и размыкании цепи	79
<i>Лабораторная работа 13.</i>	
Измерение активного сопротивления проводников способом амперметра-вольтметра и при помощи моста постоянного тока	86
<i>Лабораторная работа 14.</i>	
Определение удельного заряда электрона методом Томсона	93
<i>Лабораторная работа 15.</i>	
Определение параметров двумерной решетки микроскопическим и дифракционными методами	98
<i>Лабораторная работа 16.</i>	
Градуировка звукового генератора с помощью фигур Лиссажу	106
<i>Лабораторная работа 17.</i>	
Исследование затухающих электромагнитных колебаний	111
<i>Лабораторная работа 18.</i>	
Изучение вынужденных колебаний в колебательном контуре	116
<i>Лабораторная работа 19.</i>	
Исследование разряда конденсатора и определение его емкости	124

<i>Лабораторная работа 20.</i>	
Изучение элементов фотометрии	128
<i>Лабораторная работа 21.</i>	
Изучение электромагнитных волн	135
<i>Лабораторная работа 22.</i>	
Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа	139
<i>Лабораторная работа 23.</i>	
Определение показателя преломления жидкостей с помощью рефрактометра	142
<i>Лабораторная работа 24.</i>	
Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающих линз	149
<i>Лабораторная работа 25.</i>	
Изучение законов поглощения света в растворах на универсальном монохроматоре	154
<i>Лабораторная работа 26.</i>	
Изучение законов поглощения света с помощью фотометра	160
<i>Лабораторная работа 27.</i>	
Изучение вращения плоскости поляризации света. Закон Малюса	167
<i>Лабораторная работа 28.</i>	
Определение длины световой волны с помощью колец Ньютона	171
<i>Лабораторная работа 29.</i>	
Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки	176
<i>Лабораторная работа 30.</i>	
Газовый лазер непрерывного действия. Изучение явления дифракции света	181
<i>Лабораторная работа 31.</i>	
Изучение вращения плоскости поляризации света оптически активным веществом	188
<i>Лабораторная работа 32.</i>	
Изучение вращения плоскости поляризации света в магнитном поле	195
<i>Лабораторная работа 33.</i>	
Исследование фотоэлементов с внешним фотоэффектом	199
<i>Лабораторная работа 34.</i>	
Изучение теплового излучения твердых тел	204
<i>Лабораторная работа 35.</i>	
Изучение теплового излучения. Определение степени черноты вольфрама лампы накаливания	210
<i>Лабораторная работа 36.</i>	
Изучение явления интерференции света в опыте Юнга и с помощью бипризмы Френеля	218
<i>Лабораторная работа 37 (4В).</i>	
Изучение законов движения заряда в магнитном поле	224
<i>Лабораторная работа 38 (5В).</i>	
Изучение интерференционного опыта Юнга	229
Приложение	235

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вторая часть курса общей физики, традиционно включающая в себя разделы «Электромагнетизм, колебания, волны и оптика», базируется на фундаментальных теоретических представлениях, охватывающих огромное множество разнообразных эффектов и явлений. Освоение лабораторного практикума позволяет студентам продемонстрировать основные законы электромагнетизма и оптики, ознакомиться с принципами работы измерительной аппаратуры; привить им навыки экспериментальной работы, развить способность планировать и проводить эксперименты по заданным методикам.

Настоящее учебное пособие по второй части курса «Физика» является итогом многолетнего опыта работы кафедры «Физика» Севастопольского государственного университета со студентами ряда инженерных специальностей. Пособие содержит описание 38 лабораторных работ по разделам «Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Оптика» и написано в соответствии с программой дисциплины «Физика» для ГОС 3-го поколения. Большинство работ рассчитано на выполнение в течение двухчасового занятия.

В описании каждой лабораторной работы содержатся, цель эксперимента, рекомендуемая литература, теоретическое введение, обоснование используемых методик, приборы и принадлежности, порядок выполнения работ, получение и обработка экспериментальных данных. В заключение предложены контрольные вопросы для самоподготовки студентов.

В процессе подготовки к лабораторным занятиям студент должен изучить теорию вопроса в соответствии с рекомендованной литературой, составить в рабочей тетради краткий конспект выполняемой работы с описанием теоретического обоснования, схемы лабораторной установки, методики обработки результатов экспериментальных исследований. Отдельно составляется отчет к лабораторной работе по установленной форме. В отчете к лабораторной работе студент должен представить для защиты заполненные таблицы экспериментальных данных, результаты вычислений и оценки погрешностей измерений. Особое внимание должно уделяться графической обработке данных, а также выводам по выполненной работе. Студент должен освоить современные методы оценки погрешностей измеряемых и рассчитываемых величин с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики.

Настоящее учебное пособие подготовлено к изданию коллективом кафедры физики: С.Ф. Барановский (л.р. 10, 15), Д.П. Воронин (л.р. 17, 19), О.С. Завьялова (л.р. 1, 13, 24), М.П. Евстигнеев (л.р. 2, 9, 21), В.В. Костюков (л.р. 5, 18, 37), А.О. Лантушенко (л.р. 16, 20, 22), А.Л. Леонтович (л.р. 34), В.А. Лисютин (л.р. 3, 4, 7,), В.Л. Лучин (л.р. 6, 11), А.А. Мосунов (л.р. 22), П.Е. Гаврилов (л.р. 23), Н.В. Петренко (л.р. 25, 26, 38), О.В. Рогова (л.р. 10, 28, 30,), К.А. Рыбакова (л.р. 11, 18, 29), М.А. Рубинсон (л.р. 14, 27), В.А. Сигаев (л.р. 8, 26), И.В. Головченко (л.р. 35), Ю.В. Мухина (л.р. 33, 36, приложение)

Оформление пособия и подготовка его к печати осуществлены доцентом О.С. Завьяловой.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить характеристики электростатических полей различных конфигураций.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов.- [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При конструировании электронных приборов требуется знание характеристик электростатического поля в пространстве между электродами заданной формы. Теоретический расчет таких полей в общем случае затруднен, поэтому часто их исследуют экспериментально методом моделирования.

Основными характеристиками электростатического поля являются напряженность и потенциал. Силовой характеристикой поля служит векторная величина *напряженность* электрического поля \vec{E} , равная отношению силы \vec{F} , действующей со стороны поля на точечный пробный заряд, помещенный в рассматриваемую точку поля, к величине q_0 этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad (1)$$

Если поле создано точечным зарядом q , то напряженность на расстоянии r от этого заряда определяется соотношением

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (2)$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная, ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Энергетической характеристикой поля является *потенциал*, физический смысл которого состоит в том, что он определяет потенциальную энергию единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля. Численно потенциал равен работе по перемещению единичного положительного заряда силами поля из данной точки поля в бесконечность:

$$\varphi = A_\infty / q_0. \quad (3)$$

Потенциал поля точечного заряда равен

$$\varphi = q / 4\pi\epsilon\epsilon_0 r. \quad (4)$$

Геометрическое место точек равного потенциала называется *экипотенциальной поверхностью*.

Графически электростатическое поле изображают с помощью силовых линий и экипотенциальных поверхностей. *Силовой линией* называется линия, касательная к которой в каждой точке пространства совпадает с направлением вектора напряженности поля в этой точке. Силовые линии электростатического поля не являются замкнутыми, они начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном или, в случае одиночного положительного заряда, уходят в бесконечность. Это характерно для потенциальных полей. В потенциальном поле работа сил поля по перемещению заряда не зависит от формы пути, а определяется начальным и конечным положением заряда. Силовые линии перпендикулярны экипотенциальным поверхностям.

Вектор напряженности поля и потенциал связаны между собой. При перемещении заряда q из точки a экипотенциальной поверхности с потенциалом φ в точку b экипотенциальной поверхности с потенциалом $\varphi + d\varphi$ (рис. 1) совершается работа

$$dA = q(\varphi - (\varphi + d\varphi)), \quad (5)$$

которую можно выразить и через напряженность

$$dA = qE dr. \quad (6)$$

Приравнявая эти два выражения для работы dA , получаем

$$E = -d\varphi / dr. \quad (7)$$

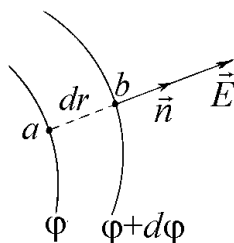


Рисунок 1

Величина $d\varphi / dr$ характеризует быстроту изменения потенциала с расстоянием в направлении нормали к экипотенциальной поверхности и называется *градиентом потенциала*

$$\vec{E} = -\vec{grad} \varphi. \quad (8)$$

Знак "-" показывает, что вектор напряженности направлен в сторону уменьшения потенциала.

Метод математического моделирования электростатического поля основан на том факте, что электрическое поле при стационарном токе в слабо проводящей жидкости или твердой среде является потенциальным, как и электростатическое. Форма и взаимное расположение электродов должны быть такими же, как и в моделируемом приборе. При таком моделировании силовым линиям электростатического поля соответствуют линии тока, а поверхностям равного потенциала - поверхности равных напряжений. Измере-

ние поля в токопроводящей среде выполнить значительно проще, чем в непроводящей. Для таких измерений используются зонды (электроды), которые представляют собой хорошо изолированные по всей длине, кроме конца, проводники. Для измерения разности потенциалов между двумя точками поля в токопроводящей среде необходимо поместить в эти точки зонды, подключенные к вольтметру. Так можно на токопроводящей бумаге наметить линии равного потенциала и построить силовые линии напряженности, перпендикулярные к линиям равного потенциала.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Планшет с электродами.
2. Микроамперметр.
3. Источник питания.
4. Зонд.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Упражнение 1

5.1.1. В настоящей работе моделируется распределение потенциала электростатического поля внутри цилиндрического конденсатора. К токопроводящей бумаге прижаты два коаксиальных цилиндрических электрода. Плотность тока на расстоянии r от оси системы равна

$$j(r) = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi r d}, \quad (9)$$

где d - толщина бумаги, I - полный ток, проходящий по бумаге.

Из закона Ома в дифференциальной форме следует

$$\begin{aligned} E(r) &= j(r) / \sigma \\ E(r) &= I / 2\pi \sigma d, \end{aligned} \quad (10)$$

где σ - электропроводность бумаги.

Экспериментальная установка собрана так, что измеряется разность потенциалов (напряжение U) между наружным электродом, потенциал которого принят равным нулю, и данной точкой поля. Из соотношения (7) следует, что

$$U(r) = - \int_{r_H}^r E(r) dr, \quad (11)$$

откуда

$$\frac{I}{2\pi \sigma d} = \frac{U_0}{\ln(r_H / r_B)}. \quad (12)$$

Тогда

$$U(r) = \frac{U_0}{\ln(r_H / r_B)} \ln \frac{r_H}{r}, \quad (13)$$

$$E(r) = \frac{U_0}{\ln(r_H / r_B)} \cdot \frac{1}{r}. \quad (14)$$

Цель лабораторной работы состоит в определении опытным путем зависимостей $U(r)$ и $E(r)$ и сравнении их с теоретическими выражаемыми формулами (13) и (14).

5.1.2. Описание установки и методика проведения эксперимента

Электрическая схема изображена на рис. 2, где 1 - наружный электрод радиуса r_H ; 2 - проводящая бумага; 3 - центральный электрод радиуса r_B ; 4 - зонд; 5 - микроамперметр; 6 - дополнительное сопротивление.

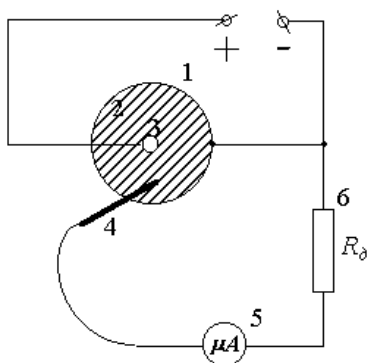


Рисунок 2

Схема питается постоянным регулируемым напряжением. В качестве измерительного прибора используют микроамперметр, который из-за большого дополнительного сопротивления R_d работает в режиме вольтметра. Благодаря большому дополнительному сопротивлению подключение измерительной цепи не вносит заметных искажений в измеряемую силу тока, следовательно, и в падение напряжения $U(r)$ между исследуемой точкой и наружным электродом. Если пренебречь сопротивлением в контакте зонда с проводящей бумагой и внутренним сопротивлением микроамперметра, то ток, протекающий через микроамперметр, равен

$$I(r) = \frac{U(r)}{R_d}. \quad (15)$$

Для более точного определения $I(r)$ измерения проводят для нескольких точек, находящихся на одинаковом расстоянии от оси модели, и берут среднее значение

$$\langle I(r) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(r), \quad (16)$$

где n - число измерений. Тогда

$$U(r) = \langle I(r) \rangle \cdot R_d. \quad (17)$$

Находим $U(r)$, изменяя r в интервале от r_B до r_H с шагом Δr . Напряженность $E(r)$ можно приближенно определить как:

$$E(r) = \frac{U(r) - U(r + \Delta r)}{\Delta r}. \quad (18)$$

5.1.3. Порядок выполнения работы

1. Подключить электрическую схему к источнику питания.

2. Коснуться зондом внутреннего электрода и поворотом рукоятки потенциометра, регулирующего напряжение, добиться того, чтобы стрелка микроамперметра отклонилась на всю шкалу, показывая максимальный ток I_0 , протекающий через прибор. Тогда

$$U_0 = I_0 R_\partial.$$

3. Устанавливая зонд в точки с радиальными координатами r , изменяющимися на 0,01 м, т.е. $(r_B + 0,01)$ м, $(r_B + 0,02)$ м, $(r_B + 0,03)$ м и т.д. на токопроводящей бумаге около луча 1 (рис. 3), записать показания микроамперметра в табл. 1.

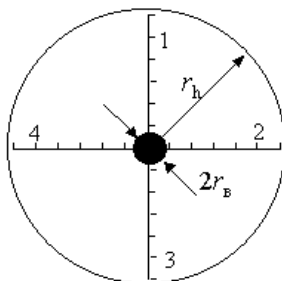


Рисунок 3

Т а б л и ц а 1

№	Расстояние	Ток $I_i(r)$, А				средний ток	$U(r)$, В	
п/п	r , м	Лучи				$\langle I(r) \rangle$, А	Эксперим.	Теорет.
		1	2	3	4		$U(r)$	$U(r)$
1								
2								
...								

4. Повторить измерения на 2-, 3-, 4-м лучах.

5. Выключить питание, зонд вставить в гнездо на установке.

5.1.4. Обработка результатов измерений

1. Вычислить $U_0 = I_0 R_\partial$.

2. Рассчитать для каждого значения r :

а) среднее значение тока

$$\langle I(r) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(r)$$

б) экспериментальное значение разности потенциалов

$$U(r) = \langle I(r) \rangle \cdot R_\partial$$

в) теоретическое значение разности потенциалов

$$U_T(r) = \frac{U_0}{\ln(r_H / r_B)} \ln \frac{r_H}{r}$$

г) занести полученные результаты в табл. 1.

3. Рассчитать для всех указанных значений r теоретические значения напряженности по формуле

$$E_T(r) = \frac{U_0}{\ln(r_H / r_B)} \cdot \frac{1}{r}.$$

4. Найти для тех же значений r экспериментальные значения напряженности

$$E(r) = \frac{U(r) - U(r + 0,01)}{0,01}.$$

5. Внести значения $E(r)$ и $E_T(r)$ в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расстояние r , м							
$E(r)$, В/м							
$E_T(r)$, В/м							

6. По данным табл. 1 и 2 построить графики зависимости U_T и U от r и E_T и E от r и сравнить экспериментальные кривые с теоретическими.

5.2. Упражнение 2

5.2.1. Описание установки и методика проведения эксперимента

Электрическое поле можно моделировать и полем, создаваемым переменным током звуковой частоты.

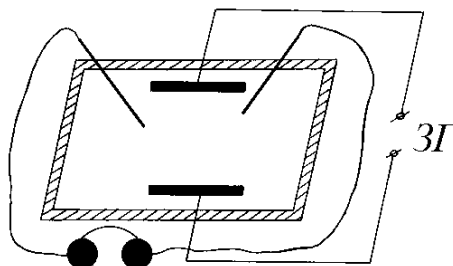


Рисунок 4

В данном опыте электроды, подключенные к звуковому генератору, располагаются на влажной бумаге, которой покрыта текстолитовая плита, помещенная в ванночку (рис. 4). Индикатором служит телефон, провода от которого заканчиваются щупами. Если щупы попали на различные эквипотенциальные поверхности, то через телефон потечет ток, и исследователь услышит в наушниках звук. Если щупы расположены на одной и той же эквипотенциальной поверхности, то звук отсутствует. Основываясь на этом, можно построить систему эквипотенциальных линий.

5.2.2. Порядок выполнения работы

1. Налить в ванночку немного воды и хорошо смочить в ней лист бумаги.

2. Мокрую бумагу наложить на текстолитовую плиту. Следить за тем, чтобы бумага не подсыхала. Расположить на бумаге электроды и с помощью соединительных проводов подать на них напряжение от звукового генератора (ЗГ).

3. Щуп, оканчивающийся металлическим острием, установить на расстоянии 1 – 1,5 см от одного из электродов. Вторым щупом (с грифелем на конце) найти и отметить 8 – 10 точек, для которых в телефоне отсутствует звук (или звук минимален). Соединить все эти точки линией, определяя тем самым линию равного потенциала. Переставить первый щуп еще на 1 – 1,5 см и найти новую эквипотенциальную линию. Повторить это несколько раз, отмечая соответствующие эквипотенциальные линии. Отметить на бумаге положение электродов, обведя их карандашом. Опыты выполнить при различных конфигурациях электродов:

а) поле плоского конденсатора (рис. 5).

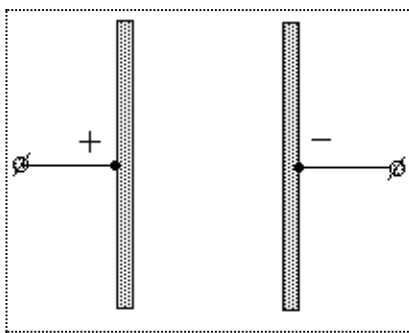


Рисунок 5

б) Между пластинами плоского конденсатора находится металлическое кольцо (рис. 6). Отметить эквипотенциальные линии между кольцом и пластинами конденсатора. Убедиться в том, что вся поверхность внутри кольца является эквипотенциальной.

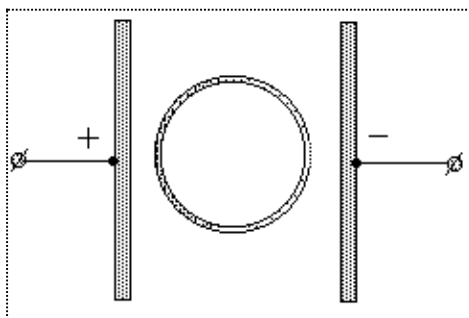


Рисунок 6

в) Поле точечного заряда (рис. 7). Одну клемму от ЗГ подключить к кольцевому электроду, а вторую – к электроду малого размера, помещенному в центре кольцевого.

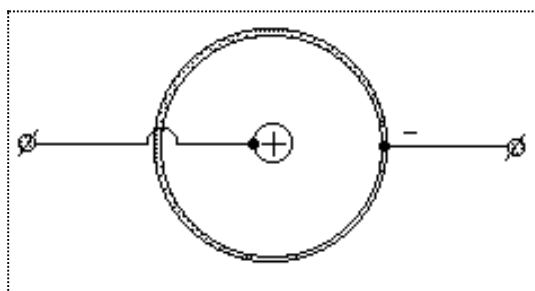


Рисунок 7

г) Поле двух точечных одноименных зарядов (рис. 8). Оба заряда находятся внутри кольца и соединены между собой проводником.

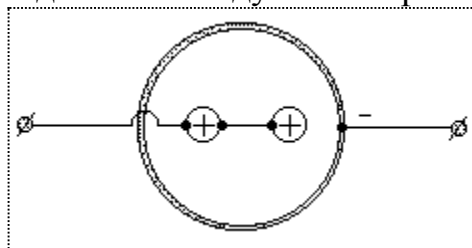


Рисунок 8

д) Поле разноименных зарядов (рис. 9).

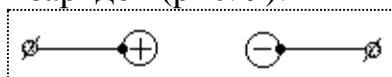


Рисунок 9

4. На основании выполненных измерений представить графическое изображение изученных электрических полей, построив эквипотенциальные поверхности и соответствующее семейство силовых линий поля.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение напряженности и потенциала электрического поля. Назовите единицы их измерения.
2. Выведите формулы напряженности и потенциала электрического поля, создаваемого точечным зарядом.
3. Дайте определение силовой линии, эквипотенциальной поверхности электрического поля.
4. Выведите формулу устанавливающую соотношение между разностью потенциалов и напряженностью электрического поля.
5. Докажите, что силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.
6. Поясните суть используемых методов моделирования электростатического поля.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ МОСТА СОТТИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение мостиковой схемы и определение с ее помощью емкости конденсатора.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: Учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989.- 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. – 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Емкость C проводника численно равна величине заряда, который нужно сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$\tilde{N} = \frac{q}{\phi}.$$

Емкость проводника зависит от формы, его линейных размеров и диэлектрической проницаемости среды, окружающей проводник. Единицей емкости в СИ является фарада, 1 Ф - емкость проводника, в котором изменение заряда на 1 кулон меняет его потенциал на 1 вольт.

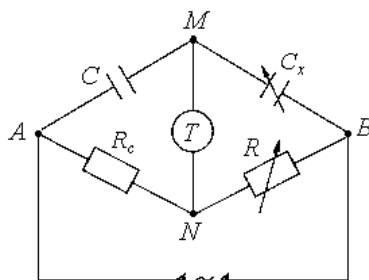


Рисунок 1

В технике используют устройства, состоящие из двух или более разномы заряженных проводников с равными по величине зарядами называемых конденсаторами. В зависимости от формы проводников конденсаторы бывают плоскими, сферическими, цилиндрическими и т.п. Емкость конденсатора характеризует систему обоих проводников в их взаимном расположении, а не отдельный проводник. Для практики важно уметь точно измерять величину электрической емкости конденсатора. Для этого в электротехнике используют различные методы и схемы. Наиболее точные результаты дают мостовые схемы измерения емкости.

В данной работе для определения емкости конденсатора используют мост Сотти, схема которого изображена на рис. 1. В схеме введены следующие обозначения:

T - телефонные наушники,

C_x - неизвестная емкость,

C - известная емкость,

R_c - резистор с известным сопротивлением,

R - магазин резисторов.

Переменный ток в точке A разветвляется по двум направлениям AMB и ANB . В точке M ток вновь разветвляется, однако, если потенциалы точек M и N одинаковы, то по участку MN ток не потечет, и в телефонные наушники сигнал, подаваемый звуковым генератором $ЗГ$, поступать не будет:

$$U_A - U_M = \frac{q}{C}; \quad U_M - U_B = \frac{q_x}{C_x}; \quad (1)$$

$$U_A - U_N = I_1 R_c; \quad U_N - U_B = I_2 R,$$

Если $U_M = U_N$, то четыре уравнения преобразуются в два:

$$\frac{q}{C} = I_1 R_c \quad \frac{q_x}{C_x} = I_2 R. \quad (2)$$

Если через телефон ток не потечет, то конденсаторы C и C_x можно считать соединенными последовательно, и тогда $q = q_x$. Кроме того, токи в ветвях AN и NB тоже будут равны. Разделив равенство (1) на (2), учитывая равенство токов в ветвях AN и NB и равенство зарядов конденсаторов, получим:

$$\frac{C_x}{C} = \frac{R_c}{R} \quad \text{или} \quad C_x = \frac{R_c}{R}. \quad (3)$$

Полученное выражение позволяет вычислить емкость неизвестного конденсатора, если в формулу (3) подставить значение сопротивления R (подобранный с помощью магазина резисторов), при котором в телефоне отсутствует сигнал.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Звуковой генератор (ЗГ).
2. Эталонный конденсатор.
3. Конденсатор с неизвестной емкостью.
4. Резистор с известным сопротивлением (1000 Ом).
5. Магазин резисторов.
6. Телефон (наушники) и соединительные проводники.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему, изображенную на рис. 1.
2. Записать значение C - емкости эталонного конденсатора:

$$(C \pm \Delta C).$$

3. Записать значение известного сопротивления R_c :

$$(R_c \pm \Delta R_c).$$

4. Подключить один конденсатор C_{x1} и, меняя сопротивление R , добиться минимальной слышимости сигнала в наушниках. Опыт повторить три раза. Затем подключить другой конденсатор C_{x2} и проделать те же операции. Те же измерения проделать при последовательном и параллельном соединении двух конденсаторов. Результаты измерений записать в табл. 1. Вычислить C_x по формуле (3).

Т а б л и ц а 1

№	R , Ом	$\langle R \rangle$, Ом	C_x , Ф
1. 2. 3.			$C_{x1} =$
1. 2. 3.			$C_{x2} =$
1. 2. 3.			$C_{x \text{ послед}} =$
1. 2. 3.			$C_{x \text{ парал}} =$

5. Определить погрешности измерений для одного конденсатора.

6. Оценить границу доверительного интервала ΔC_x при заданной надежности α по формуле

$$\Delta C_x = \sqrt{\left(\frac{R_c}{R}\right)^2 \cdot (\Delta C)^2 + \left(\frac{C}{R}\right)^2 \cdot (\Delta R_c)^2 + \left(\frac{R_c C}{R^2}\right)^2 \cdot (\Delta R)^2},$$

где следует принять $R = \langle R \rangle$, $C = \langle C \rangle$, $R_c = \langle R_c \rangle$.

Для этого необходимо предварительно найти ΔR_{cm} (статистическое) по заданной преподавателем надежности и ΔR_{np} (приборное) по классу точности магазина резисторов, и если их величины приблизительно равны, то определить границу доверительного интервала ΔR по формуле

$$\Delta R = \sqrt{t_{\alpha}^2(n) \cdot (\Delta S_R)^2 + \left(\frac{t_{\alpha}(\infty)}{3}\right)^2 \cdot (\Delta R_p)^2}.$$

7. Сделать выводы по работе и записать окончательный результат в виде

$$C = \langle C \rangle + \langle \Delta C \rangle, \text{ Ф}; \quad \varepsilon = \frac{\langle \Delta C \rangle}{\langle C \rangle} \cdot 100\%.$$

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дайте определение емкости проводника, назовите единицы ее измерения в системе СИ.
2. Напишите формулы для электроемкости плоского конденсатора и шара.
3. Выведите формулы емкости при последовательном и параллельном соединении конденсаторов.
4. Объясните сущность мостовой схемы измерения емкости, перечислите ее достоинства и недостатки.
5. Объясните методику оценки погрешности измерения емкости конденсатора в данной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.
ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЛАМПЫ**

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Знакомство с устройством и назначением различных электроизмерительных приборов: амперметра, вольтметра, ваттметра.
2. Изучение способов подключения приборов в цепь.
3. Измерение мощности лампы накаливания.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов.- [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электроизмерительным прибором называется устройство, предназначенное для измерения электрических величин: тока, напряжения и т.п. Все электроизмерительные приборы подразделяются на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. В приборах первого типа измеряемая величина отсчитывается по показаниям предварительно отградуированных приборов. В приборах второго типа в процессе измерения производится прямое сравнение с эталонной мерой (компенсаторы, мосты). В данной работе будут рассмотрены электроизмерительные приборы непосредственной оценки.

Основными данными, характеризующими электроизмерительный прибор, являются: система, класс точности, пределы измерения, чувствительность и внутреннее сопротивление прибора. Все эти данные обычно отмечены на шкале прибора условными знаками.

Из основных технических требований, предъявляемых к электроизмерительным приборам, следует указать следующие: прибор должен потреблять малую мощность и не вносить заметных искажений в электрическую цепь.

В зависимости от того, какое физическое явление положено в основу действия прибора, электрические измерительные приборы подразделяются на следующие системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, ферродинамическую, индукционную, термоэлектрическую, вибрационную, тепловую, детекторную, электронную, фотоэлектрическую, электролитическую, электростатическую.

Устройство приборов некоторых наиболее распространенных систем будет рассмотрено ниже.

3.1. Основные характеристики электроизмерительных приборов

3.1.1. Класс точности

Все электроизмерительные приборы разделяются на 8 классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности прибора γ численно равен выраженной в процентах относительной погрешности вида измерения

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_m} \cdot 100\%,$$

где ΔA - максимальная абсолютная погрешность; A_m - максимальное значение диапазона прибора.

Пример. Миллиамперметром на 75 мА измерен ток 30 мА. Класс точности прибора 0,2, то есть $\gamma = 0,2\%$. Следовательно, максимальная возможная ошибка при измерении любого тока в пределах 0...75 мА будет

$$\Delta A = \frac{\gamma}{100\%} \cdot A_m = \frac{0,2\%}{100\%} \cdot 75 \text{ мА} = \pm 0,15 \text{ мА}$$

и относительная погрешность измерения тока 30 мА равняется:

$$\varepsilon = \frac{0,15 \text{ мА}}{30 \text{ мА}} \cdot 100\% = 0,5 \%$$

3.1.2. Чувствительность

Чувствительностью электроизмерительного прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя к измеряемой величине, вызвавшей это перемещение, т. е. $S = \frac{n}{x}$, где n - угловое или линейное перемещение; x - измеряемая величина.

Пример. При измерении тока $I = 2,5$ А указатель прибора изменил свое положение на $n = 50$ делений. Следовательно, чувствительность прибора по току будет равна $S_I = \frac{n}{I} = \frac{50 \text{ дел}}{2,5 \text{ А}} = 20 \frac{\text{дел}}{\text{А}}$.

3.1.3. Пределы измерений и цена деления

Значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы, называется пределом измерения этого прибора A_m .

Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерений (многопредельные приборы). Необходимо помнить, что при измерениях таким прибором на различных пределах цена деления будет различной.

Цена деления прибора равна значению измеряемой величины, соответствующей одному делению шкалы прибора.

Пример. Амперметр имеет два предела измерений: 15 А и 30 А. Шкала имеет 150 делений. Цена деления для предела 15 А равна $\frac{15 \text{ А}}{150 \text{ дел}} = 0,1 \frac{\text{А}}{\text{дел}}$, для предела 30 А равна $0,2 \frac{\text{А}}{\text{дел}}$.

3.2. Системы электроизмерительных приборов

3.2.1. Магнитоэлектрическая система (рис. 1)

Приборы этой системы предназначены для измерений величины тока и напряжения в цепях постоянного тока. Схема устройства прибора магнитоэлектрической системы следующая.

Между полюсами постоянного магнита расположена рамка, по виткам которой протекает измеряемый ток. При отсутствии тока плоскость витков рамки располагается параллельно силовым линиям магнитного поля. При прохождении тока рамка стремится повернуться так, чтобы ее плоскость оказалась перпендикулярной силовым линиям магнитного поля. Этому повороту противодействует пружина.

Как только момент силы упругости пружины M_2 станет равным моменту силы взаимодействия магнитных полей - поля тока и поля постоянного магнита M_1 , рамка останавливается. К рамке неподвижно прикреплена стрелка, которая дает возможность по шкале произвести отсчет измеряемой величины тока или напряжения.

Вращающий момент, возникающий из-за взаимодействия магнитных полей, пропорционален току, текущему по рамке: $M_1 = k_1 I$.

Противодействующий момент пружины пропорционален углу поворота рамки (углу закручивания пружины): $M_2 = k_2 I$. Отсюда $\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot I = kI$, т. е.

угол поворота рамки, а следовательно, и стрелки, пропорционален силе тока, что обеспечивает равномерность шкалы прибора.

Достоинствами магнитоэлектрических приборов являются: высокая чувствительность и точность показаний, равномерность шкалы, малая чувствительность к внешним магнитным полям.

3.2.2. Электромагнитная система (рис. 2)

Приборы электромагнитной системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепи переменного тока. Принцип действия приборов этой системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, по которой протекает измеряемый ток, и железного или ферритового сердечника, являющегося подвижной частью.

Железный сердечник в форме круглой пластины закреплен эксцентрично на оси. При прохождении тока по неподвижной катушке сердечник втягивается внутрь катушки так, чтобы его пересекало как можно больше силовых линий магнитного поля. Движению сердечника противодействует спиральная пружина. Магнитное поле катушки пропорционально току, намагничивание сердечника тоже увеличивается с возрастанием тока. Поэтому можно приблизительно считать, что в электромагнитном приборе вращающий момент M_1 пропорционален квадрату тока $M_1 = k_1 I^2$ (k_1 - коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора). Противодействующий момент M_2 , создаваемый пружинной, пропорционален углу поворота подвижной

части прибора: $M_2 = k_2 \alpha$, k_2 - коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств пружины).

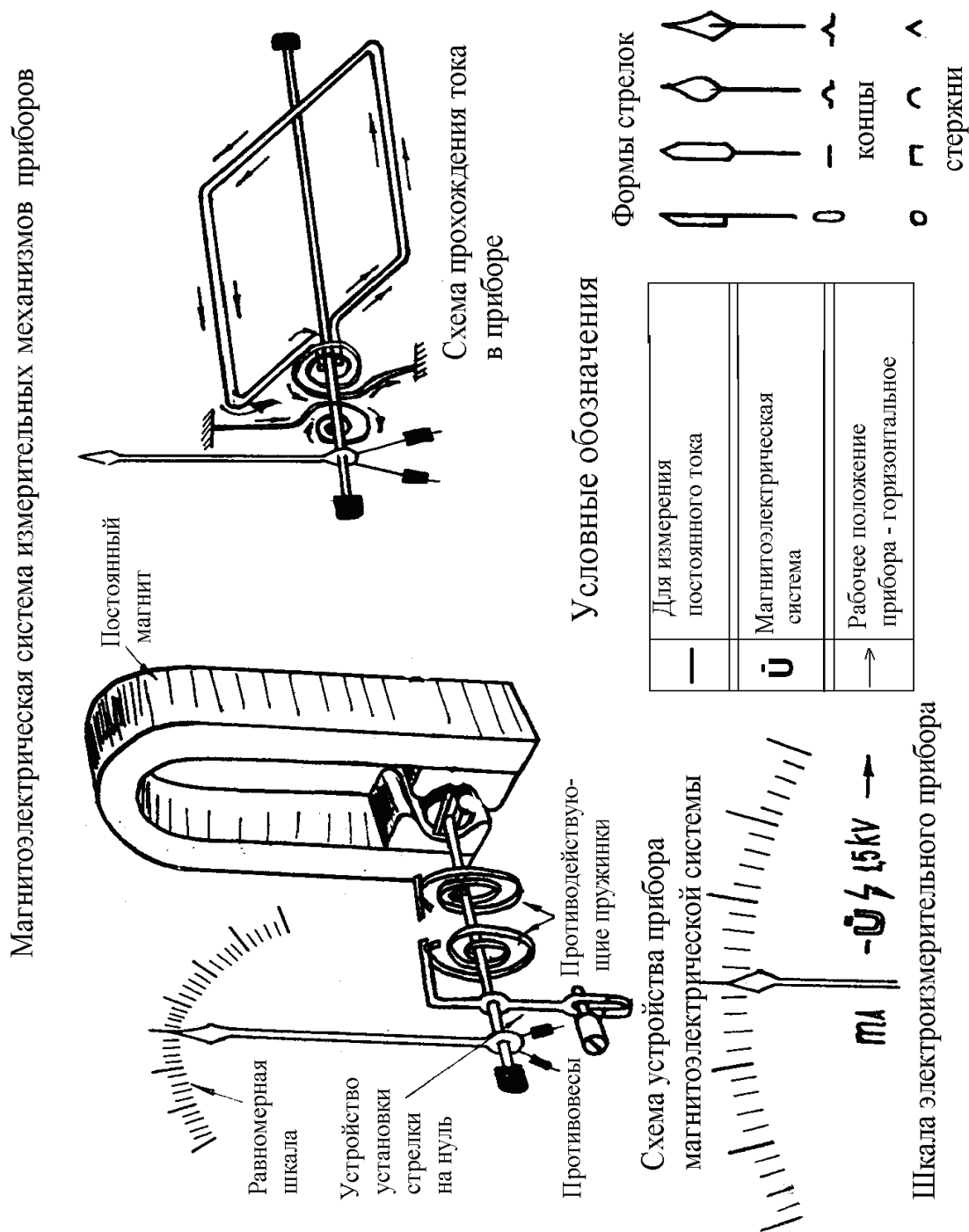


Рисунок 1

Сердечник при прохождении тока останавливается тогда, когда моменты M_1 и M_2 окажутся равными, т.е.

$$k_1 I^2 = k_2 \alpha, \text{ откуда } \alpha = \frac{k_1}{k_2} I^2.$$

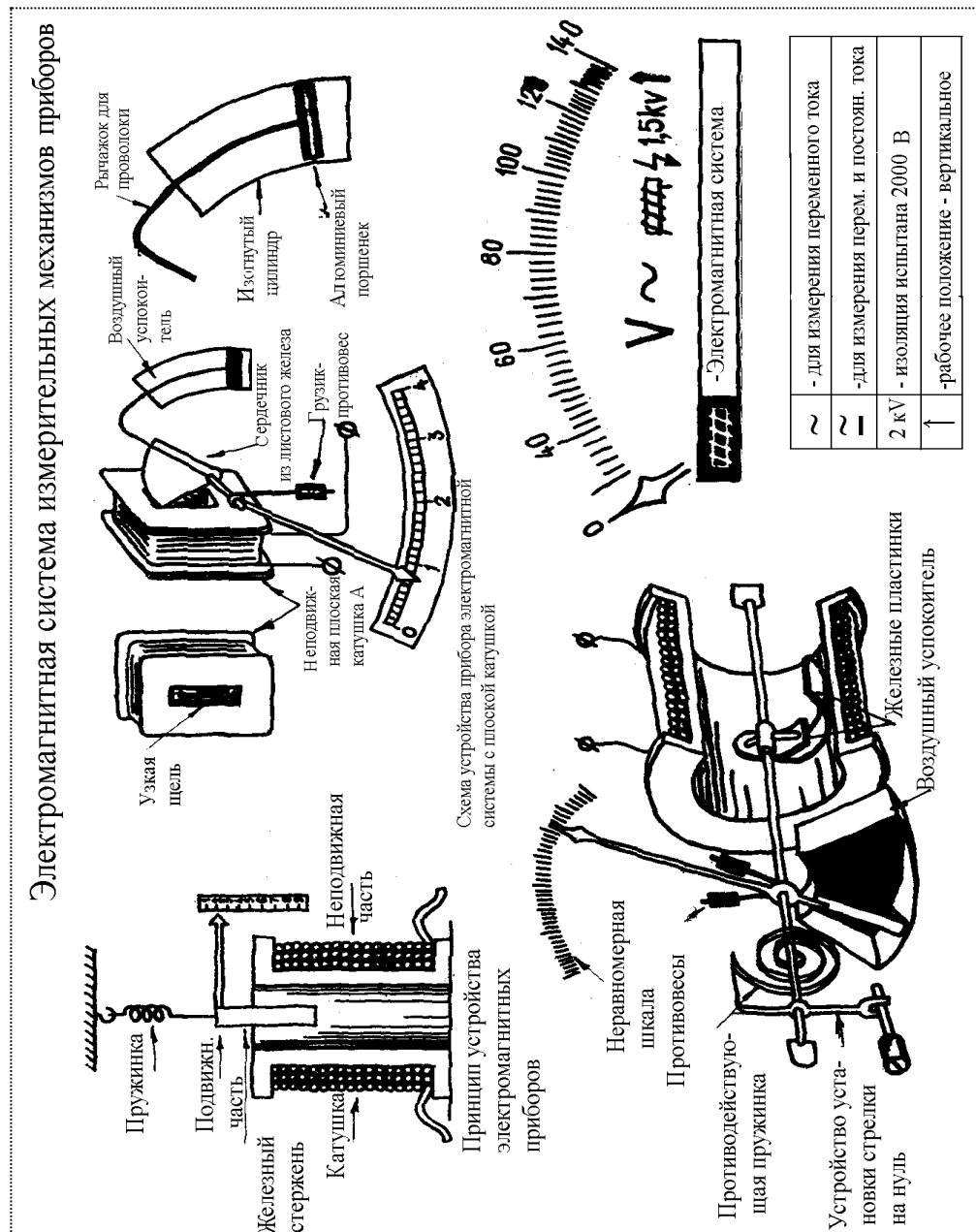


Рисунок 2

Отсюда видно, что у приборов электромагнитной системы отклонение стрелки, скрепленной с сердечником, пропорционально квадрату тока, т.е. шкала такого прибора неравномерна. С изменением направления тока меняется как направление магнитного поля неподвижной катушки, так и полярность намагничивания сердечника. Поэтому при изменении направления тока сердечник не будет выталкиваться, а будет втягиваться. Таким образом, приборы электромагнитной системы можно применять при измерениях как постоянного тока, так и переменного. В этом основное достоинство приборов этой системы. Кроме того, к достоинствам этих приборов нужно отнести: простоту конструкции, механическую прочность, выносливость в отношении перегрузок.

Недостатками приборов электромагнитной системы являются: неравномерность шкалы, меньшая точность, чем у магнитоэлектрических приборов, большая зависимость показаний от внешних магнитных полей.

3.2.3. Электродинамическая система (рис. 3)

Электродинамические измерительные приборы предназначены для измерения тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного тока.

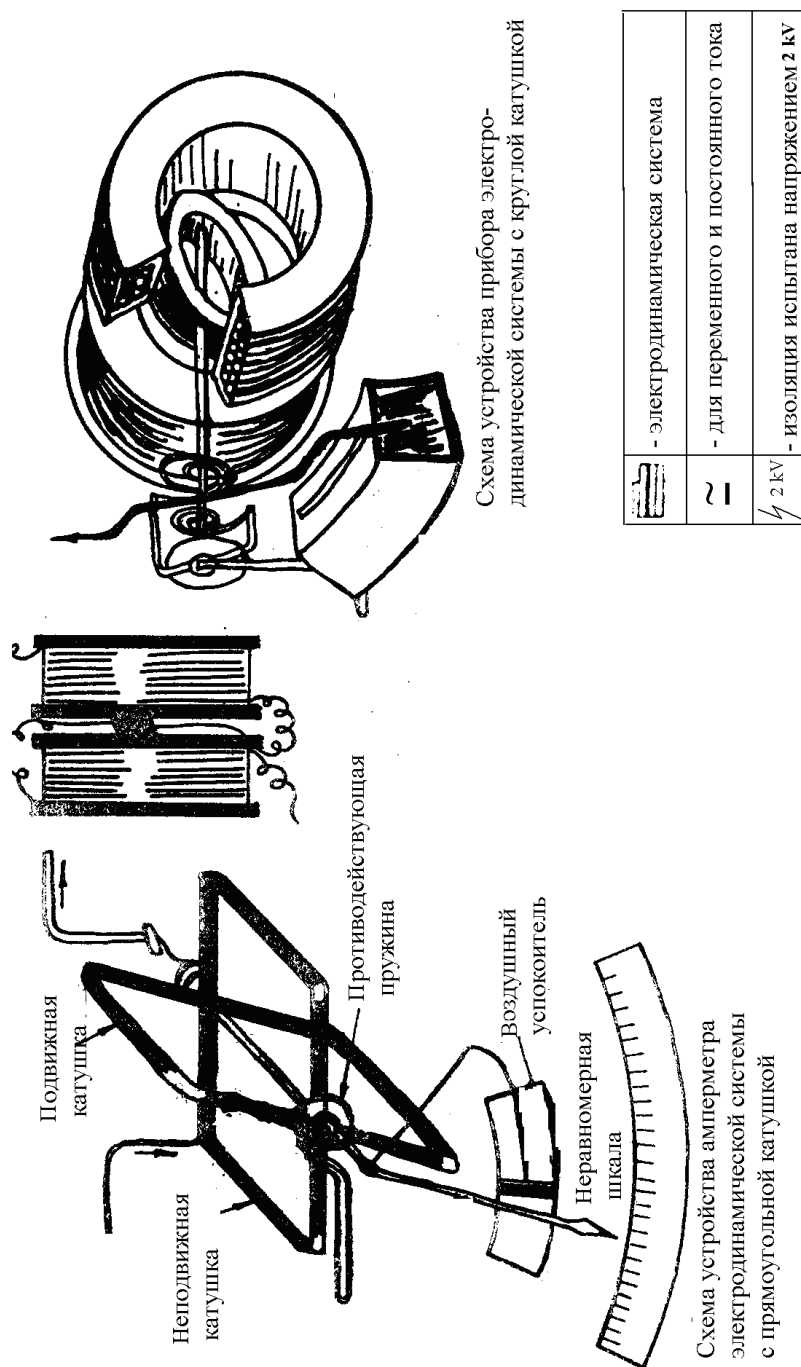


Рисунок 3

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии катушек, по которым протекает измеряемый ток. Таким образом, приборы электродинамической системы отличаются от приборов магнитоэлектрической системы тем, что магнитное поле создается не постоянным магнитом, а катушкой, питаемой измеряемым током. На рис. 3 схематически изоб-

ражен прибор электродинамической системы. Внутри неподвижно закрепленной катушки 1 может вращаться на оси подвижная катушка 2, с которой жестко связана стрелка 3, перемещающаяся над шкалой. Измеряемый ток протекает через обе катушки. Внутри каждой катушки возникает магнитное поле. Взаимодействие магнитных полей и приводит к созданию вращающего момента M_1 , под влиянием которого подвижная катушка будет стремиться повернуться так, чтобы плоскость ее витков стала параллельна плоскости витков неподвижной катушки, а их магнитные поля совпали бы по направлению. Этому противодействует пружина. Подвижная катушка останавливается тогда, когда вращающий момент станет равным противодействующему.

Катушки в электродинамических приборах в зависимости от назначения соединяются между собой параллельно или последовательно. Если катушки прибора соединить параллельно, то он может быть использован как амперметр. Если же катушки соединить последовательно и присоединить к ним добавочное сопротивление, то прибор может быть использован как вольтметр.

В первом приближении вращающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален как току, протекающему по подвижной катушке I_1 , так и току, протекающему по неподвижной катушке I_2 :

$$M_1 = k_1 I_1 I_2.$$

Противодействующий момент, создаваемый пружиной, пропорционален углу закручивания, т.е. углу поворота стрелки $M_2 = k_2 \cdot \alpha$. Подвижная катушка останавливается, когда $M_1 = M_2$, т.е. $k_1 I_1 I_2 = k_2 \alpha$ или

$$\alpha = k \cdot I_1 I_2. \quad (1)$$

Если катушки соединены последовательно, то $I_1 = I_2$ и $\alpha = k \cdot I^2$.

Отсюда видно, что шкала электродинамического прибора неравномерна. Тем не менее, совершенствованием конструкции катушек можно улучшить шкалу, приблизить ее к равномерной.

При перемене направления тока в обеих катушках направление вращающего момента не меняется, т.е. приборы этой системы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока.

3.2.4. Электродинамический ваттметр (рис. 4)

Устройство электродинамического ваттметра принципиально такое же, как и электродинамических амперметра и вольтметра, отличия заключаются лишь в параметрах катушек и в способе их подключения. Ваттметр имеет не менее 3...6 контактов. Неподвижная катушка ваттметра намотана толстым проводом и включается последовательно с тем участком цепи, мощность которого измеряется. Подвижная катушка содержит большое число витков тонкой проволоки и подключается параллельно потребителю. Последовательно с подвижной катушкой вводится добавочное сопротивление. Ток, идущий по подвижной катушке, пропорционален напряжению, подаваемому на нагрузку:

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + r_o}.$$

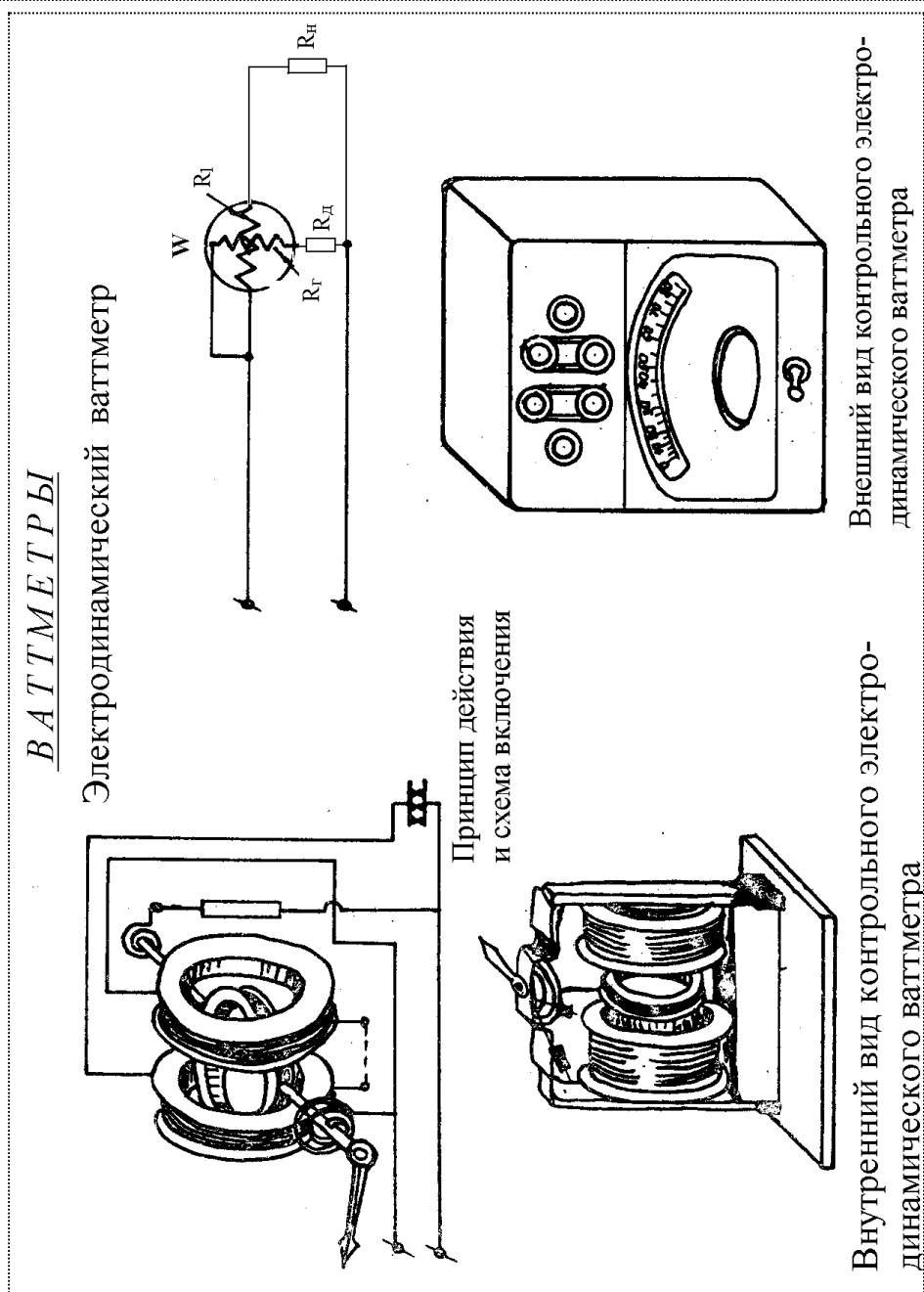


Рисунок 4

Угол отклонения стрелки прибора в соответствии с (1):

$$\alpha = kI_1 \frac{U}{R_2 + r_0}.$$

Так как $I_1 U = W$ - мощность, потребляемая на нагрузке, то

$$\alpha = k'W. \quad (2)$$

Таким образом, отклонение подвижной части пропорционально мощности, и поэтому шкалу прибора можно проградуировать в ваттах. Из формулы (2) следует, что шкала ваттметра равномерна.

3.2.5. Электрический счетчик (рис. 5)

Прибор электродинамической системы можно использовать и для определения работы тока. Такие приборы называются счетчиками. Работу,

произведенную током, можно подсчитать по формулам $A = W \cdot t$ (при $W = \text{const}$) или $A = \int_0^t W dt$, т.е. счетчик является интегрирующим прибором.

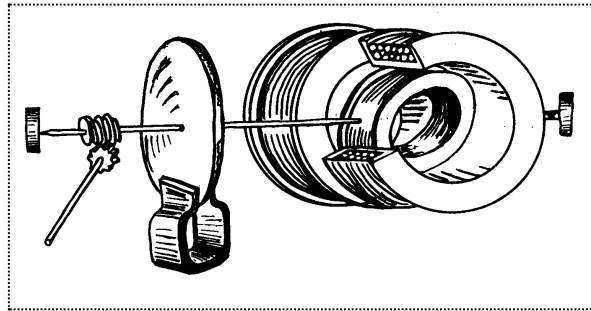


Рисунок 5

Для того чтобы прибор электродинамической системы сделать счетчиком, нужно к оси подвижной катушки не прикреплять пружину, а насадить на ось металлический диск, который, вращаясь, проходит между полюсами постоянного магнита.

При движении диска в магнитном поле в нем будут возникать индукционные токи Фуко. Взаимодействие магнитных полей (магнитного поля токов Фуко и магнитного поля постоянного магнита) приведет к возникновению тормозящего момента.

Величина индукционных токов Фуко пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего диск, то есть пропорциональна угловой скорости вращения. Следовательно, и тормозящий момент M_2 будет пропорционален угловой скорости: $M_2 = k' \frac{d\alpha}{dt} W$.

Если подвижную катушку прибора подключить параллельно нагрузке, а неподвижную - последовательно, то вращающий момент M_1 будет пропорционален мощности $M_1 = k'' W$.

Диск будет вращаться равномерно тогда, когда сумма моментов всех сил, действующих на него, будет равна нулю, то есть когда вращающий момент будет равен тормозящему: $M_1 = M_2$, или

$$k'' W = k' \frac{d\alpha}{dt}, \text{ откуда } d\alpha = k W dt, \quad k = \frac{k''}{k'}.$$

Интегрирование последнего равенства дает:

$$\alpha = 2\pi n = k \int_0^t W dt = kA. \quad (3)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части прибора будет пропорционален работе, производимой током.

Вал счетчика связывается через червячную передачу с десятичным счетным механизмом, который считает число оборотов. Из формулы (3) следует, что число оборотов оси вала счетчика пропорционально произведенной работе.

3.2.6. Тепловая система (рис. 6)

Принцип действия приборов тепловой системы основан на изменении длины проводника, по которому протекает ток, вследствие его нагревания. Устройство прибора тепловой системы схематически показано на рис. 6.

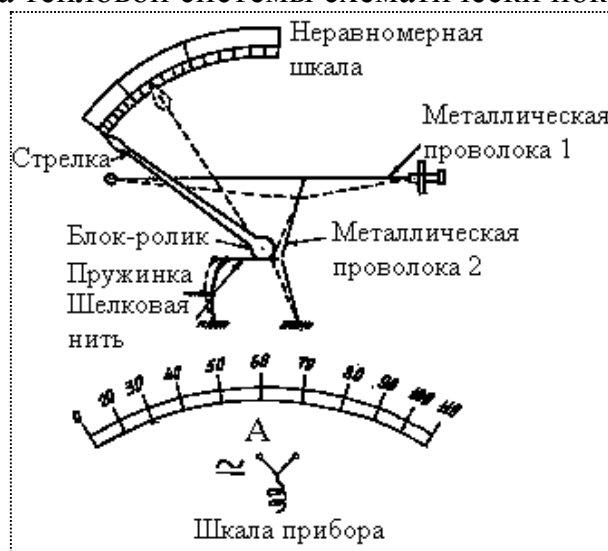


Рисунок 6

Измеряемый ток проходит по проволоке 1, концы которой закреплены. Эта проволока изготавливается из сплава платины с иридием или серебром. К ней посередине припаяна другая металлическая проволока 2, которая оттягивается тонкой шелковой нитью, перекинутой через блок-ролик. Конец этой нити прикреплен к стальной пружине, которая и производит натяжение нити. К блоку прикреплена стрелка прибора, перемещающаяся над шкалой.

При протекании тока по проволоке 1 происходит ее нагревание, в результате чего она удлиняется, натяжение проволоки 2 и нити ослабевает, пружина отходит влево, что и вызывает отклонение стрелки. Так как количество теплоты, выделяемой током, пропорционально среднему значению квадрата тока и не зависит от направления тока $Q = I_{cp}^2 R t$, то приборы тепловой системы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока. Однако шкала прибора неравномерна.

3.2.7. Внутреннее сопротивление приборов

По роду измеряемой величины приборы делятся на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры и т.д.

АМПЕРМЕТРЫ - приборы, служащие для измерения величины тока и **ВОЛЬТМЕТРЫ** - приборы, служащие для определения напряжения на каком-либо участке цепи, могут иметь одинаковую принципиальную схему устройства. Отличаются такие приборы лишь внутренними характеристиками и способом подключения.

Амперметр включается в цепь последовательно, так как через прибор должен пройти весь ток, величина которого измеряется. Внутреннее сопротивление амперметра должно быть малым, чтобы присутствие измерительного прибора как можно меньше влияло на работу цепи.

Мощность потерь в амперметре рассчитывается по формуле $W = I^2 R_{вн}$, из которой видно, что потери будут тем меньше, чем меньше сопротивление прибора $R_{вн}$.

Вольтметр подключается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором необходимо измерить. Чтобы через вольтметр шел как можно меньший ток, внутреннее сопротивление вольтметра должно быть большим.

Мощность потерь в вольтметре рассчитывается по формуле $W = \frac{U^2}{R_{ср}}$. Из





этой формулы следует, что потери меньше тогда, когда внутреннее сопротивление прибора велико.

По роду используемого тока все приборы делятся на 3 типа: приборы, применяемые в цепях постоянного тока, приборы, применяемые в цепях переменного тока, приборы, которые могут быть использованы как в цепях постоянного тока, так и в цепях переменного тока.

Каждый прибор имеет на панели знак:

—	-Прибор для измерения постоянного тока
~	-Прибор для измерения переменного тока
— ~ —	-Прибор, предназначенный для измерения как постоянного, так и переменного тока.

На панели прибора также имеется значок, показывающий систему прибора:

-  -Магнитоэлектрическая система.
-  -Электромагнитная система.
-  -Электродинамическая система.
-  -Тепловая система.

3.3. Переменные резисторы

Для изменения режимов работы электрической цепи применяются переменные резисторы, которые можно включать в схему различными способами. Рассмотрим два способа включения резистора в схему.

3.3.1. Реостаты

Переменный резистор, включенный в схему последовательно, называется реостатом (рис. 7). С помощью реостата можно менять величину тока в цепи.

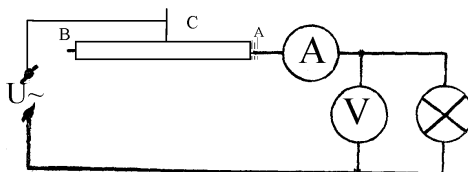


Рисунок 7

Когда движок реостата C находится в точке A , ток в цепи имеет максимальное значение. Когда движок C сдвинут в точку B , ток в цепи минимален. Однако теоретически уменьшать ток до нуля при таком подключении переменного резистора невозможно (для этого необходимо иметь бесконечно длинный реостат).

3.3.2. Потенциометры

Потенциометрический способ включения переменного резистора в схему приведен на рис. 8.

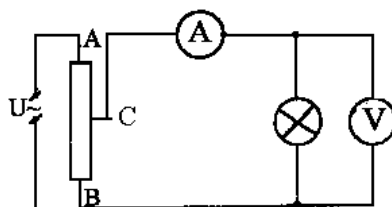


Рисунок 8

Если движок C подвинуть к точке B , то разность потенциалов между точками B и C будет равна нулю, по участку $BVAC$ ток не потечет.

Отодвигая движок от точки B , мы увеличиваем разность потенциалов между точками B и C . Чем дальше мы отодвигаем движок, тем большая разность потенциалов возникает между точками B и C , т.е. тем большее напряжение подается на нагрузку. Когда движок переместится в точку A , то на нагрузку будет сниматься максимальное напряжение, равное напряжению источника тока.

Величина тока нагрузки тоже будет меняться при перемещении движка от точки A к точке B от максимального значения до нуля.

3.4. Расчет характеристик приборов при сборке схемы

При сборке потенциометра необходимо обратить внимание на маркировку прибора, в которой указано, для каких режимов работ, он предназначен (дано R и I_{\max}).

Чтобы выяснить, пригоден ли данный резистор в данной схеме, нужно произвести следующий расчет. Предположим, что к источнику напряжением 220 В подключаем резистор сопротивлением 300 Ом, тогда при отключенной нагрузке (или точки B и C совмещены) по сопротивлению потечет ток i_{AB} .

Если движок C отодвинуть от точки B , ток потечет и по нагрузке. Пусть величина тока нагрузки i_n . На основании закона Кирхгофа ток на участке AC равен сумме токов на нагрузке и на участке BC :

$$i_{AC} = i_n + i_{BC}.$$

При перемещении движка от точки B к точке A ток на нагрузке все возрастает (так как все большее напряжение подается на нагрузку). Следовательно, возрастает и ток на участке AC .

Когда движок близок к точке A , по участку AC течет ток, равный практически

$$i_{AC\max} = i_{n,\max} + i_{BC},$$

где $i_{BC} = \frac{U}{R} = \frac{220 \text{ В}}{300 \text{ Ом}} \cong 730 \text{ мА}$.

Если лампа накаливания рассчитана на 60 Вт, то

$$i_{\text{нmax}} = 700 \text{ мА} + 280 \text{ мА} \approx 1 \text{ А}, \text{ а } i_{\text{гmax}} = \frac{60 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} = 280 \text{ мА}.$$

Для потенциометрического включения переменного резистора в цепь необходимо, чтобы допустимое значение тока через резистор было больше или равно сумме максимальных токов нагрузки и реостата, замкнутого на источник питания.

Далее при сборке схемы необходимо выяснить, какого диапазона приборы нужно использовать.

Диапазоном или пределом измерения приборов называется то максимальное значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы.

Расчет производить следующим образом.

Пример. Мощность используемой лампы 60 Вт, напряжение источника 220 В, соответственно, максимальный ток, который может течь в цепи лампы

$$i_{\text{нmax}} = \frac{60 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} = 280 \text{ мА},$$

следовательно, диапазон амперметра должен быть не менее 300 мА.

Абсолютная ошибка измерения у данного прибора постоянная при фиксированном пределе измерения. Как было сказано выше, она равна пределу измерения, умноженному на класс точности и деленному на 100 %.

Относительная ошибка данного измерения равна абсолютной ошибке, деленной на результат измерения: $\varepsilon = \frac{\Delta i}{i} 100\%$.

Чем больше измеренная величина i , тем точнее она определяется. И следовательно, нужно избегать таких измерений, при которых измеряемая величина намного меньше ее предельного значения, т.е. диапазона.

Максимальное напряжение на лампе будет порядка 220 В, следовательно, нужно подобрать вольтметр соответствующего диапазона (порядка 300 В).

3.5. Подключение ваттметра в цепь для измерения мощности

Ваттметр, используемый в данной лабораторной работе, многодиапазонный или многопредельный прибор. Подвижная катушка ваттметра имеет несколько различных добавочных резисторов. Подключение добавочных резисторов приводит к изменению диапазона прибора.

Неподвижная токовая катушка также состоит из двух секций, которые можно подключать либо последовательно, либо параллельно. При этом меняется сопротивление неподвижной катушки, что также приводит к изменению диапазона прибора.

Добавочные резисторы подключаются с помощью рукоятки А (рис. 9). Переключение секций неподвижной катушки производят с помощью латунных планок.

Для определения диапазона (предела измерения) ваттметра необходимо умножить предел измерения по напряжению - число, стоящее против точки на рукоятке А, на меньший предел измерения по току, если ваттметр подключен в соответствии с рис. 9, а), и на больший предел измерения по току, если прибор подключен в соответствии с рис. 9, б).

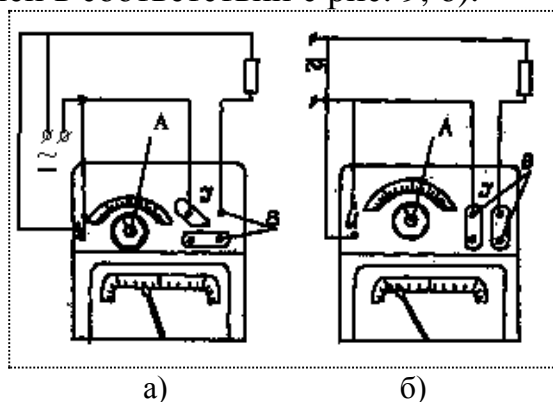


Рисунок 9

Чтобы выразить показания ваттметра в ваттах, надо найти цену деления прибора (ц.д.). Для этого диапазон ваттметра W_0 надо разделить на полное число делений на шкале n_{max} , т.е. $ц.д. = \frac{W_0}{n_{max}}$. Тогда показание прибора x равно $n(ц.д.)$, где n - число делений, показываемых стрелкой прибора при данном измерении.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Выяснить мощность лампы накаливания. Определить пригодность данного резистора как потенциометра расчетом, приведенным в пункте 3.4.

4.2. Рассчитать необходимые диапазоны амперметра и вольтметра, согласно пункту 3.4, установить их на приборах.

4.3. Выбрать пределы измерения по току и по напряжению на ваттметре и установить их на приборе, как показано в п. 3.5. Рассчитать диапазон ваттметра.

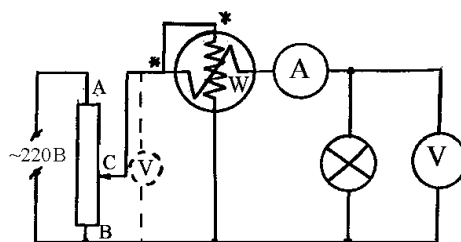


Рисунок 10

4.4. Занести в отчет данные всех электроизмерительных приборов: систему прибора, класс точности, диапазон, число делений шкалы.

4.5. Собрать электрическую цепь, согласно схеме, изображенной на рисунке 10. При включении ваттметра в цепь нужно соединять вместе концы от неподвижной и подвижной катушек, обозначенные звездочками.

4.6. Перед тем, как подать питание в схему, необходимо обязательно установить движок потенциометра так, чтобы напряжение на нагрузке отсутствовало (т. е. движок совместить с точкой *B*). Подать напряжение на потенциометр.

4.7. С помощью потенциометра установить значения напряжения на лампе накаливания по указанию преподавателя.

4.8. Для каждого заданного значения напряжения снять показания амперметра, вольтметра и ваттметра, результаты занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№	<i>U</i>		ΔU	<i>I</i>		ΔI	$W_{\text{изм}}$		$\Delta W_{\text{изм}}$		$W_{\text{расч}}$	$\Delta W_{\text{расч}}$	
	ц.д.=...			ц.д.=...			ц.д.=...						
	дел	В		В	дел		мА	мА					
1													
2													
3													

4.9. После снятия показаний приборов отключить питание.

4.10. Определить для каждого измерения абсолютные и относительные приборные погрешности амперметра, вольтметра и ваттметра.

4.11. Рассчитать для каждого измерения мощность лампы накаливания по показаниям амперметра и вольтметра:

$$W_{\text{расч}} = IU.$$

4.12. Определить погрешности:

$$\Delta W_{\text{расч}} = I \cdot \Delta U + U \cdot \Delta I \quad \text{и } \varepsilon,$$

где *I* и *U* - измеренные значения тока и напряжения; ΔI и ΔU - приборные погрешности амперметра и вольтметра;

$$\varepsilon = \frac{\Delta W_{\text{расч}}}{W_{\text{расч}}} \cdot 100\% = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right) \cdot 100\%.$$

4.13. Сделать выводы по работе, окончательный результат представить в виде:

$$U_i: \quad W_{i \text{ изм}} = W_i \pm \Delta W_i; \quad W_{i \text{ расч}} = W_i \pm \Delta W_i; \quad \varepsilon = \frac{\Delta W}{W} \cdot 100\%.$$

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство и принцип действия электроизмерительных приборов различных систем. Охарактеризуйте их достоинства и недостатки, укажите границы применения.

2. Дайте определение предела измерения, цены деления, чувствительности и класса точности электроизмерительного прибора.

3. Нарисуйте схемы включения в электрическую цепь амперметра, вольтметра, ваттметра.

4. Какими должны быть внутренние сопротивления амперметра, вольтметра? Почему?
5. Рассчитайте по заданию преподавателя шунт для амперметра, добавочное сопротивление для вольтметра.
6. Дайте определение работы и мощности тока.
7. Сформулируйте понятия мощности постоянного и переменного тока, действующих значений тока и напряжения, коэффициента мощности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомление с устройством, назначением и принципом действия электронного осциллографа.
2. Измерение чувствительности осциллографа и чувствительности трубки.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Савельев И.В. Курс физики: Учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
- 2 Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. – 560 с.
- 3 Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- Академия, 2009. – 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электронный осциллограф – многофункциональный радиоизмерительный прибор, предназначенный для наблюдения импульсных сигналов. С помощью осциллографа можно исследовать форму кривых, описывающих сигнал, измерить длительность, амплитуду и частоту сигнала.

3.1. Основные блоки (узлы) электронного осциллографа

Основные блоки электронного осциллографа: электронно-лучевая трубка, усилители входных сигналов, генератор развертки, блок питания, синхронизирующее устройство.

3.1.1. Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевая трубка является главной деталью осциллографа. На рис. 1 схематически изображена конструкция трубки. Внутри стеклянного баллона расположены «электронная пушка», состоящая из нити накала «Н-Н», подогреваемого катода «К», управляющего электрода «УЭ», двух ускоряющих электродов – анодов «А₁» и «А₂» и двух пар отклоняющих пластин - П_х и П_у. Экран электронно-лучевой трубки покрыт люминофором, светящимся под действием попадающих на него электронов. Проводники от электродов трубки выведены через стекло баллона и оформлены снаружи в виде цоколя трубки. Внутренний объем трубки откачен до состояния высокого вакуума.

Электронная пушка создает поток электронов и формирует его в электронный луч. Электроны, излучаемые вследствие термэлектронной эмиссии катодом «К», ускоряются и фокусируются в тонкий электронный луч при помощи цилиндрических электродов «УЭ», «А₁» и «А₂». Конструкция пушки позволяет производить регулировку яркости и размеров светящегося пятна, создаваемого электронным лучом на экране осциллографа. Внутренние стенки стеклянного баллона покрывают тонким проводящим слоем, который используется для отвода во внешнюю цепь вторичных электронов, выбиваемых электронами луча с поверхности экрана, а также для экранирования луча от внешних полей.

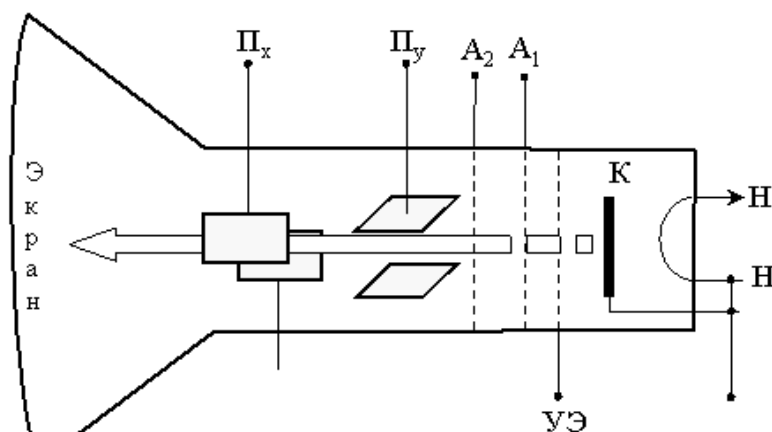


Рисунок 1

Управление электронным лучом, т.е. перемещение его по экрану в двух взаимно перпендикулярных направлениях, осуществляется при помощи электрических полей. На пути электронного луча помещают отклоняющие пластины Π_x и Π_y . Каждая пара отклоняющих пластин представляет собой плоский конденсатор, создающий однородное электрическое поле на пути луча. Электронный луч последовательно проходит сначала между первой, а затем между второй парами пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Электрическое поле между пластинами каждой пары вызывает отклонение электронного луча и перемещение светящейся точки на экране трубки. При этом вертикально расположенные пластины вызывают отклонение луча в горизонтальном направлении (X - пластины), горизонтально расположенные пластины - в вертикальном направлении (Y - пластины).

Отклонение точки на экране пропорционально величине напряжения, приложенного к пластинам, и, следовательно, положение точки на экране в данный момент времени однозначно определяется в прямоугольной системе координат величинами и знаками напряжений на отклоняющих пластинах. Таким образом, благодаря наличию в электронно-лучевой трубке двух взаимно перпендикулярных систем отклонения, управляющих электронным лучом, на экране получается видимое изображение графика функции.

Различают два основных режима работы осциллографа.

В первом, основном режиме, исследуется лишь один внешний сигнал. При этом в качестве второго сигнала используется выходное напряжение имеющегося в осциллографе генератора развертки, обеспечивающее перемещение луча по горизонтали с постоянной скоростью. Так как чаще всего интересуются исследованием внешнего сигнала как функции времени, то выходное напряжение генератора развертки делают линейно меняющимся с течением времени.

Во втором режиме на отклоняющие пластины подаются два внешних сигнала.

3.1.2. Генератор развертки

Генератор развертки вырабатывает импульсы напряжения пилообразной формы. На рис. 2 показана функциональная схема генератора развертки, основой которого является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и генератор линейно нарастающего цифрового кода.

На вход синхронизатора поступает исследуемый сигнал. Синхронизатор, в зависимости от выбранного режима работы (внутренняя синхронизация, ждущий режим) в определенные моменты времени вырабатывает короткий импульс, поступающий на схему запуска.

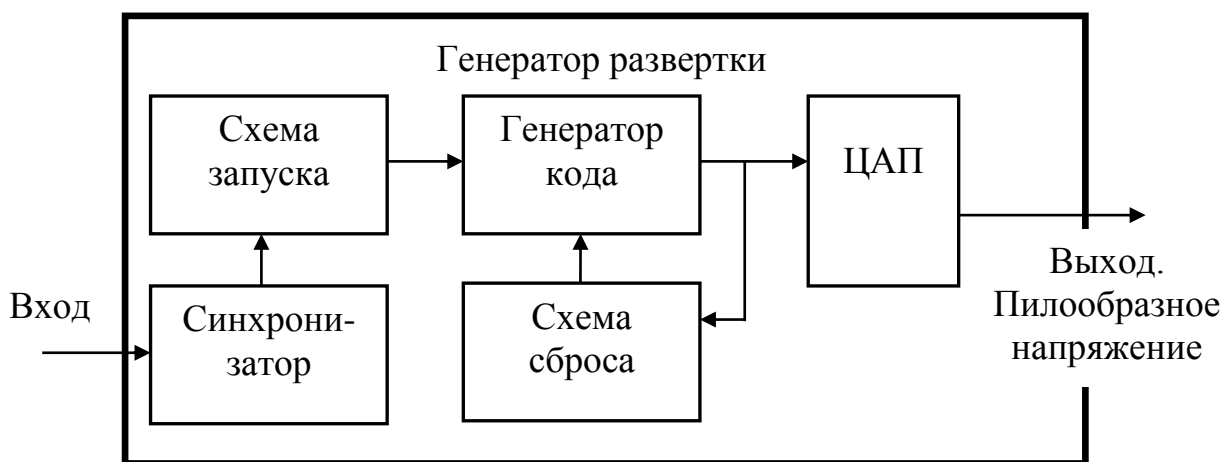


Рисунок 2

Например, при внутренней синхронизации (от самого сигнала), импульс запуска может вырабатываться, когда фаза периодического сигнала имеет строго определенные значения с учетом произвольной кратности пропусков. В случае непериодического сигнала (ждущий режим) импульс запуска вырабатывается, когда входное напряжение превысит определенное значение, регулируемое ручкой «уровень запуска». Иногда используется так же и режим внешней синхронизации, когда запуск осуществляется при поступлении постороннего сигнала, временные параметры которого жестко привязаны к исследуемому сигналу. Схема запуска включает генератор линейно нарастающего цифрового кода. Простейшая реализация генератора кода – тактовый генератор (импульсов) с возможностью изменения периода (частоты) импульсов в широких пределах (ручка «масштаб развертки») и счетчик. ЦАП преобразует цифровой код в пропорциональное напряжение U (рис. 3), подаваемое на пластины, вызывающие отклонение луча по оси X, вследствие чего электронный луч совершает прямой ход – перемещается по горизонтали слева направо со строго постоянной скоростью – участки А-В и С-Д.

Как только цифровой код достигнет определенной величины, соответствующей крайнему правому положению электронного луча (точка В и D), срабатывает схема сброса кода, и луч совершает обратный ход - быстро перемещается влево, в начало развертки – участки В-С и D-Е. Обратный ход луча на экране трубки не виден, так как в осциллографе имеется устройство, гасящее луч во время обратного хода (блок гашения обратного хода). Пилообраз-

ное напряжение делают симметричным относительно нуля, поэтому при отсутствии сигнала луч находится в центре экрана. Далее циклы развертки периодически повторяются.

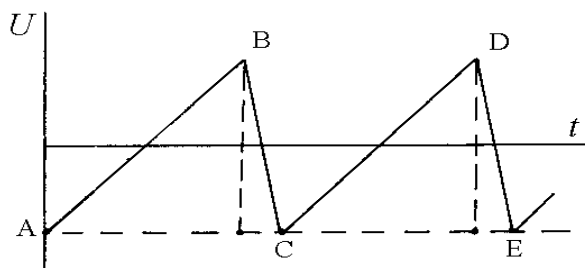


Рисунок 3

Одновременно подавая на X-пластины напряжение от генератора развертки, а на Y-пластины — исследуемое напряжение, получают на экране осциллографа развернутую кривую изменения исследуемого напряжения во времени.

Если исследуемый периодический процесс имеет период, равный или кратный периоду пилообразного напряжения, то начало каждого цикла перемещения луча по экрану будет происходить при одной и той же фазе исследуемого напряжения. Все циклы при этом будут точно накладываться друг на друга, и изображение их на экране (осциллограмма) будет казаться неподвижным.

3.1.3. Усилители входных сигналов

Имеющиеся в осциллографе усилители каналов Y и X позволяют усилить исследуемые сигналы перед подачей их на отклоняющие пластины. К усилителю вертикального отклонения (Y) в профессиональных осциллографах (в том числе и цифровых) предъявляются исключительно высокие требования по стабильности коэффициента усиления в диапазоне частот от нуля до сотен мегагерц (широкополосности) и линейности. Требования к усилителю канала X значительно менее строги.

3.1.4. Блок питания

Блок питания обеспечивает постоянным напряжением все цепи прибора и электронно-лучевой трубки. Блок питания состоит из выпрямителей и стабилизаторов для питания элементов схемы и ускоряющих и фокусирующих электродов трубки.

3.2. Структурная схема осциллографа и органы управления

На рис. 4 показана структурная схема осциллографа, а на планшете около лабораторной работы — фотография панели управления профессионального осциллографа.

Регулировка яркости электронного луча и его фокусировка осуществляется при помощи потенциометров «Яркость», «Фокус», задающих напряжения, питающие соответствующие электроды электронной трубки. Постоянное смещение луча по горизонтали и вертикали изменяется с помощью потенциометров «Баланс X» и «Баланс Y».

Исследуемое напряжение подается на «вход У», и через входной усилитель, линию задержки, и мощный усилитель канала У поступает на вертикально отклоняющие пластины. Размах сигнала на экране регулируется изменением коэффициента усиления входного усилителя с помощью переключателя «Вольт/деление». Линия задержки необходима для того, чтобы можно было наблюдать фронтальную часть импульсного сигнала.

Режим работы генератора развертки задается с помощью переключателя режимов развертки: автоколебательный режим «Внутренняя синхронизация», «ждущий» режим, «внешняя синхронизация», «однократно», «вход Х». Частота пилообразного напряжения генератора развертки задается переключателем «Время/деление».

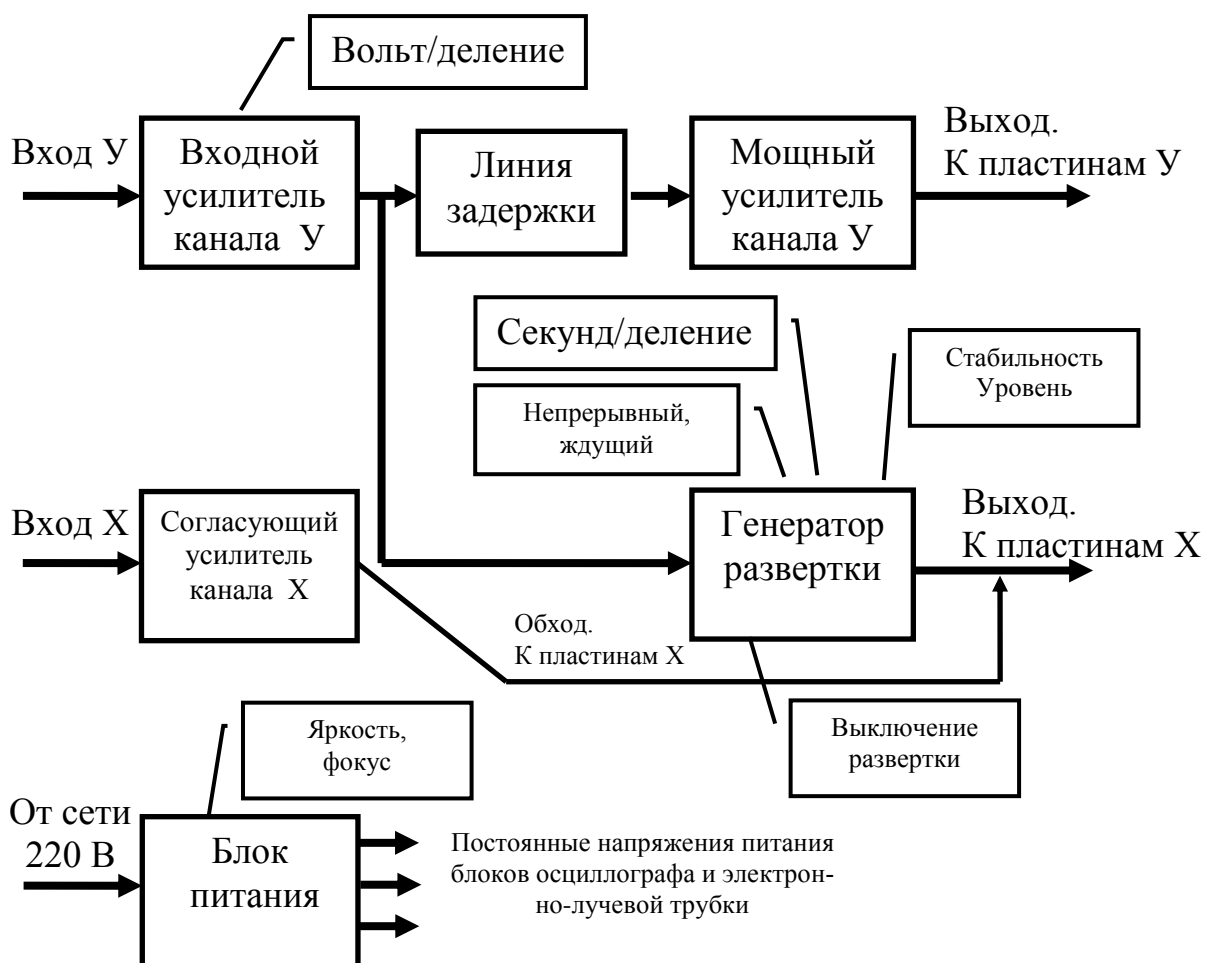


Рисунок 4

Синхронизация с исследуемым напряжением осуществляется с помощью регуляторов «Стабильность» и «Уровень» или «Синхронизация». В режиме «вход Х» генератор развертки выключается, а на горизонтальные пластины через согласующий усилитель Х подается сигнал от «входа Х».

3.3. Основные параметры осциллографов

1. Полоса пропускания – важнейшая характеристика прибора, определяемая качеством усилителей канала У. Ограничивает диапазон частот сигналов, исследование которых возможно на данном типе осциллографа.

2. Чувствительность осциллографа - величина отклонения луча по экрану при приложении напряжения 1 В на данном входе осциллографа. Чувствительность осциллографа можно изменять с помощью регулировки коэффициентов ослабления с помощью аттенюатора либо коэффициента усиления усилителя на соответствующем входе. Для характеристики осциллографа указывается величина максимальной чувствительности, измеренная при максимальном коэффициенте усиления соответствующего усилителя.

3. Минимальное время развертки - характеристика генератора развертки, определяющая возможность «растянуть» сигнал во времени.

4. Кроме того, важными параметрами осциллографа являются: размер экрана, входное сопротивление (чем больше – тем лучше), входная емкость (чем меньше – тем лучше), потребляемая от сети мощность.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Осциллограф.
2. Лабораторный трансформатор типа ИПП-УХПЧ или звуковой генератор (ЗГ).

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Включение и настройка осциллографа

Следует обратить внимание, что в зависимости от конкретного типа осциллографа, название ручек управления и их расположение на передней панели может меняться, однако общий порядок включения и настройки – стандартный.

Вилку шнура питания включить в сеть. Включить тумблер «Сеть». Должна загореться контрольная лампочка. Прогреть 2...3 минуты. На экране должна появиться горизонтальная линия развертки. Если линия не появляется, то это является следствием отклонения луча за пределы экрана, либо малой яркости луча, либо незапуском генератора развертки. В этом случае - «Яркость» - на максимум. С помощью соответствующих переключателей перевести генератор развертки в автоколебательный режим (внутренняя синхронизация), ручку «Стабильность», «Синхронизация» - по часовой стрелке (на максимум), ручку «Уровень» - против часовой стрелки (на минимум). Для возвращения луча ручки «Баланс Х» и «Баланс У» - посередине. После нахождения луча уменьшить яркость, отрегулировать фокусировку и установить линию развертки посередине экрана. Осциллограф готов к работе.

5.2. Снятие амплитудной характеристики и определение чувствительности осциллографа

Амплитудная характеристика – это зависимость размаха линии на экране от величины напряжения на соответствующем входе $l(U)$. У хорошего осциллографа амплитудная характеристика должна быть строго линейной.

Снятие амплитудной характеристики канала У. Выключить развертку. Светящуюся точку привести в центр экрана. Установить среднюю величину усиления по каналу У. Соединить вход У с калиброванным источником питания. Аттенюатором на источнике питания установить максимальное

напряжение и откорректировать усиление по каналу У так, чтобы размах линии не превосходил размеров экрана. Переключить аттенюатор на минимальное напряжение, и ступенчато его увеличивая, установить соответствие между размахом вертикальной линии и входным напряжением. Заполнить табл. 1.

Т а б л и ц а 1

	U_y , мВ	l_y , мм	U_x , В	l_x , мм
1				
2				
...				

Снятие амплитудной характеристики канала Х. Повторить все действия предыдущего абзаца, только для канала Х. Заполнить табл. 1.

Амплитудные характеристики представить в виде графиков $l_y(U_y)$ и $l_x(U_x)$. Сделать вывод о линейности амплитудных характеристик. Проведя усредненные прямые так, чтобы они проходили максимально близко ко всем экспериментальным точкам, определить усредненную чувствительность осциллографа по каналам У и Х по формуле: $S = \frac{1}{2} \frac{\Delta l}{\Delta U}$ (м/В).

5.3 Определение частоты и амплитуды напряжения в осветительной сети

Включить развертку в автоколебательный режим (внутренняя синхронизация), запустить развертку, повернув ручку «Стабильность» по часовой стрелке. Переключатель масштаба развертки установить в положение «1...5 мс/деление». Линию развертки установить по центру экрана. Переключить аттенюатор блока питания на максимальное напряжение в режиме «У». Подключить выход блока питания ко входу У осциллографа, при этом на экране должна появиться смазанная, бегущая синусоида. Переключатель «В/деление» установить так, чтобы размах изображения был не менее половины экрана. Настроить синхронизацию: повернуть ручки «Стабильность», «Уровень» против часовой до упора (при этом развертка пропадет); медленно вращая ручку «Стабильность» добиться начала «мерцания» развертки; поворачивая ручку «Уровень» добиться устойчивой развертки и четкого, неподвижного изображения синусоиды на экране. Сместить синусоиду, так, чтобы ее среднее значение располагалось посередине экрана.

Переключая масштаб развертки, измерить период синусоиды с максимальной точностью. Вычислить частоту переменного напряжения. Измерить амплитуду напряжения (или размах – удвоенную амплитуду, как удобнее) на входе У. Зная коэффициент ослабления блока питания, вычислить амплитуду напряжения в осветительной сети. Записать в отчете уравнение для мгновенного напряжения в сети. Вычислить действующее напряжение в осветительной сети. В отчете нарисовать график мгновенного напряжения на протяжении 2-, 3-х периодов.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и принцип действия электронно-лучевой трубки осциллографа.
2. Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.
3. Назначение генератора пилообразного напряжения и синхронизатора.
4. Структурная схема осциллографа.
5. Основные параметры осциллографа.
6. Какие характеристики неизвестного сигнала и как можно измерить с помощью осциллографа?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

СНЯТИЕ ГРАДУИРОВОЧНОЙ КРИВОЙ ТЕРМОПАРЫ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение метода компенсации для определения электродвижущей силы источника тока.
2. Исследование зависимости термоэлектродвижущей силы от разности температур спаев термопары.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Для определения величины электродвижущей силы термопары используется метод компенсации, так как при измерении ЭДС вольтметром всегда вносится ошибка, равная падению напряжения на внутреннем сопротивлении термопары.

Принцип измерений методом компенсации можно пояснить на примере схемы, показанной на рис. 1.

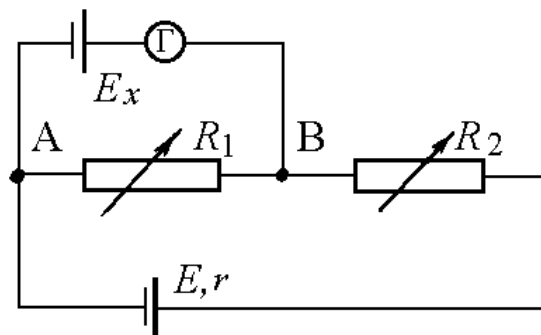


Рисунок 1

Принцип измерений методом компенсации можно пояснить на примере схемы, показанной на рис. 1.

Если ЭДС источника E_x меньше, чем ЭДС батареи E , то можно подобрать такие сопротивления резисторов R_1 и R_2 , чтобы падение напряжения на резисторе R_1 было равно электродвижущей силе E_x . В этом случае ток на участке AE_xB не протекает, что легко можно обнаружить с помощью нуль-гальванометра Γ , включенного в цепь на этом участке. Зная ЭДС E и внутреннее сопротивление r батареи, а также сопротивления резисторов R_1 и R_2 , можно с большой точностью рассчитать E_x . По закону Ома ток в контуре AR_1BR_2EA равен

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r}. \quad (1)$$

Учитывая, что падение напряжения на сопротивлении R_1 равно E_x , запишем

$$E_x = I R_1. \quad (2)$$

Решая совместно (1) и (2), получаем

$$E_x = E \frac{R_1}{R_1 + R_2 + r}. \quad (3)$$

Чтобы не вносить в результат измерения ошибку, связанную с изменением ЭДС источника с течением времени, в цепь включают симметрично термопаре E_x нормальный элемент E_n , величина ЭДС которого строго постоянна (рис. 2).

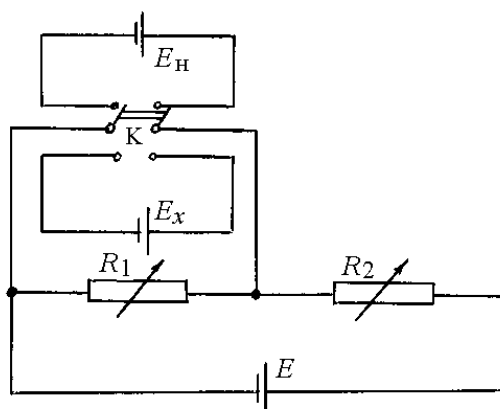


Рисунок 2

Включив в цепь с помощью перекидного ключа K нормальный элемент, можно подобрать такие значения сопротивлений R_1' и R_2' , чтобы ток через гальванометр не протекал. Тогда согласно (3) будем иметь

$$E_x = E_n \frac{R_1'}{R_1' + R_2' + r}. \quad (4)$$

Решая совместно (3) и (4), получаем

$$E_1' = E_n \frac{R_1(R_1' + R_2' + r)}{R_1'(R_1 + R_2 + r)}. \quad (5)$$

В уравнении (5) ЭДС источника E , с помощью которого достигалась компенсация, отсутствует.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Источник питания постоянного тока (вспомогательная батарея).
2. Нормальный элемент.
3. Магазин резисторов.
4. Двухполюсный переключатель.
5. Стандартная термопара.
6. Милливольтметр, проградуированный на стандартную термопару.

7. Исследуемая термопара.
8. Электрическая печь.
9. Гальванометр.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для исследования зависимости ЭДС термопары от разности температур ее спаев используется электрическая цепь, схема которой изображена на рис. 3.

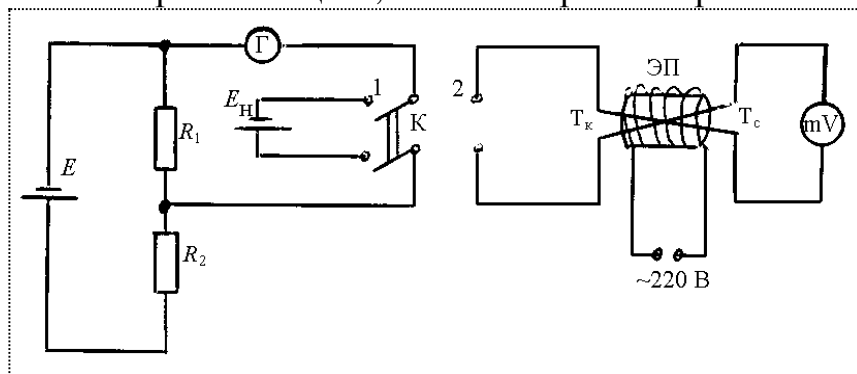


Рисунок 3

Здесь E - вспомогательная батарея; E_n - нормальный элемент Вестона; его ЭДС при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна $1,0183\text{ В}$; при других температурах ЭДС нормального элемента определяется по формуле

$$E_n = 1,0183 - 0,0000406(T - 20\text{ }^{\circ}\text{C})\text{ (В)},$$

где T - температура, $^{\circ}\text{C}$; T_x - исследуемая термопара; T_c - стандартная термопара, подключенная к милливольтметру; с помощью этой термопары измеряется разность температур между горячим спаем (помещенным внутри печи) и холодным (находящимся при комнатной температуре); K - переключатель; с его помощью в цепь включают поочередно исследуемую термопару и нормальный элемент и считают, что исследуемая термопара имеет такую же разность температур спаев, как и контрольная; ЭП - электропечь с рабочим напряжением 220 В .

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить цепь по схеме (рис. 3).
2. Поместить в электропечь спаи контрольной и исследуемой термопар.
3. Поставить переключатель K в положение 1 (при этом в цепь включается нормальный элемент E_n). Подобрать сопротивления R_1' так, чтобы ток через гальванометр G отсутствовал. Величина сопротивления R_1' при этом порядка нескольких тысяч Ом.
4. Включить в сеть электропечь и, дав ей нагреться на 10^0 выше комнатной температуры (что будет отмечено с помощью контрольной термопары и соединенного с нею милливольтметра), измерить ЭДС исследуемой термопары. Для этого переключатель K поставить в положение 2 и снова подобрать R_1 так, чтобы ток через гальванометр не протекал. При этом величина сопротивления R_1 порядка единиц Ом.

5. Повторить измерения ЭДС термопары при увеличении разности температур ΔT ее спаев через каждые 10^0 .
6. ЭДС исследуемой термопары вычислить по формуле (5).
7. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

E_n , мВ	R'_1 , Ом	R'_2 , Ом	r , Ом	ΔT , °C	R_1 , Ом	R_2 , Ом	E_{xi} , мВ	α_i $\frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}}$	$\Delta\alpha_i$ $\frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}}$

8. По полученным данным построить график $E_x = f(\Delta T)$, откладывая по оси абсцисс значения разности температур ΔT спаев, а по оси ординат - термоэлектродвижущую силу E_x .

9. Для всех значений $E_x = f(\Delta T)$ найти постоянную термопары α_i по формуле $\alpha_i = \frac{(E_x)_i}{(\Delta T)_i}$.

10. Определить $\langle \alpha \rangle$.

11. Вычислить $\langle \Delta \alpha \rangle$ методом средних значений.

12. Сделать вывод по работе и результаты представить в виде

$$\alpha = \langle \alpha \rangle \pm \langle \Delta \alpha \rangle; \quad \varepsilon = \frac{\langle \Delta \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle} \cdot 100\%$$

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип метода компенсации.
2. Какое применение находят термопары?
3. Поясните, для чего в цепь включают нормальный элемент?
4. Какая величина называется постоянной термопары? От чего она зависит и в каких единицах измеряется?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТМЕТРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование зависимости электродвижущей силы термопары от разности температур ее спаев.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если из двух различных металлов или полупроводников составить замкнутую цепь и места контактов (спаи) поддерживать при разных температурах, то в цепи возникает электрический ток. Его называют термоэлектрическим током, а описанное выше устройство - термопарой. В термопаре происходит преобразование тепловой энергии в электрическую:

$$E_T = \frac{\kappa}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где e - заряд электрона; κ - постоянная Больцмана; n_1, n_2 - концентрация свободных электронов в каждой из ветвей термопары; T_1 и T_2 - температуры спаев.

Величина $\alpha = \frac{\kappa}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ называется постоянной термопары.

3.1. Определение электродвижущей силы термопары с помощью вольтметра

Электродвижущую силу термопары можно измерять вольтметром, если его внутреннее сопротивление достаточно велико по сравнению с внутренним сопротивлением термопары.

Составим электрическую цепь из источника тока (с электродвижущей силой E и внутренним сопротивлением r и вольтметра, внутреннее сопротивление которого R_B (рис. 1).

Сопротивление подводящих проводов R . Согласно закону Ома

$$E = Ir + IR + IR_B, \quad (2)$$

где

$$U_B = IR_B; \quad (3)$$

- падение напряжения на внутреннем сопротивлении вольтметра.

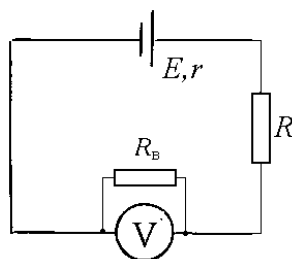


Рисунок 1

При измерении ЭДС термопары вольтметром, подразумевается, что

$$U_B = E, \quad (4)$$

т.е. допускается систематическая ошибка

$$\Delta E_C = I(R + r), \quad (5)$$

что в процентном отношении к измеряемой величине E составляет

$$\delta_C = \frac{I(r + R)}{IR_B} \cdot 100\%, \quad (6)$$

$$\text{или } \delta_C = \frac{r + R}{R_B} \cdot 100\%.$$

Сопротивление ветвей термопары r и сопротивление подводящих проводов R - малы ($\sim 10^{-2}$ Ом). При внутреннем сопротивлении вольтметра $R_B \sim 10^9$ Ом систематическая ошибка оказывается незначительной:

$$\delta_C = (10^{-2}/10^9) \cdot 100\% = 10^{-9}\%. \quad (7)$$

4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Проградуировать термопару - означает получить зависимость ее термо-ЭДС E_x от разности температур спаев ΔT .

В данной работе термоЭДС и разность температур спаев определяют с помощью одного и того же вольтметра.

Для измерения разности температур спаев исследуемой термопары используют контрольную хромель-копелиевую термопару, градуировочная кривая которой задана графически и в виде таблицы.

Спаи контрольной A и исследуемой B термопар помещают в узкую и длинную печь, т. е. поддерживают при одинаковой температуре T_x (рис. 2).

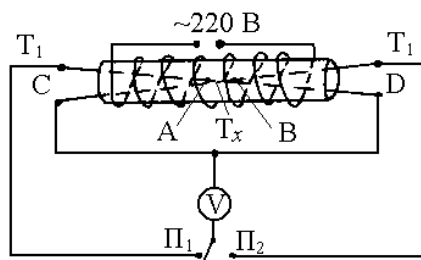


Рисунок 2

Концы термопар C и D выводят наружу и поддерживают при комнатной температуре T_1 . С помощью переключателя $\Pi_1\Pi_2$ вольтметр можно подключать поочередно то к одной, то к другой термопаре.

Измерив ЭДС контрольной термопары, по градуировочной кривой определяют разность температур ΔT ее спаев, а следовательно, и спаев исследуемой термопары.

5. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Стандартная (хромель-копелиевая) термопара.
2. Двухполюсный переключатель.
3. Электродпечь.
4. Исследуемая термопара.
5. Вольтметр.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить электродпечь и нагреть ее до указанной на установке температуры.
2. Измерить вольтметром ЭДС E_x исследуемой термопары (переключатель в положении $П_2$).
3. Измерить ЭДС E контрольной термопары (переключатель в положение $П_1$).
4. Выключив печь из сети, провести попарные измерения E_x и E по п.п. 2,3 через каждую минуту до тех пор, пока температура внутри печи не станет постоянной.
5. По градуировочному графику хромель-копелиевой термопары определить разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$ для всех измеренных значений. Результаты занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ опыта	E_x , мВ	E , мВ	ΔT , К	α , мВ/ К
1				
2				
3				
4				
5				
6				
.				
.				

7. По результатам измерений и вычислений построить график $E_x=f(\Delta T)$.
8. Вычислить среднее значение постоянной термопары $\langle \alpha \rangle$.
9. Сделать выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите известные методы измерения ЭДС, проанализируйте их достоинства и недостатки.
2. Обоснуйте точность метода измерения ЭДС источника с помощью вольтметра.
3. Опишите устройство и назначение термопары.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить метод определения горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли и получить его значение.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики.- М.: Высш. шк., 1998.- 542 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Земля имеет форму эллипсоида вращения. Если пренебречь ее сплюснутостью (разность радиусов на экваторе и полюсах составляет 21 км), Землю можно принять за шар. Вращающийся земной шар намагничен и обладает магнитным полем. Магнитное поле шара практически совпадает с полем стержнеобразного магнита или диполя, расположенного в его центре. Поэтому Землю можно рассматривать как гигантский магнит, который смещен примерно на 400 км от центра планеты в сторону Тихого океана и наклонен к оси вращения Земли приблизительно под углом 12° . Точки на поверхности Земли, в которые проектируется ось такого диполя, называются геомагнитными полюсами. Следует иметь в виду, что в северном полушарии расположен южный магнитный полюс, а в южном - северный.

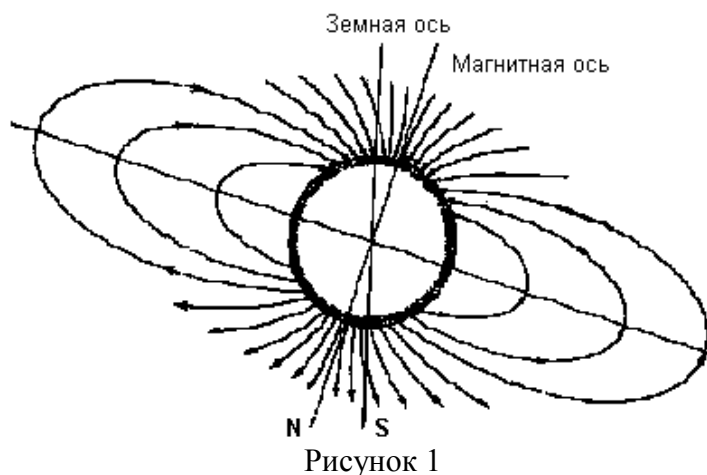


Рисунок 1

Если подвесить магнитную стрелку так, чтобы она могла свободно вращаться вокруг центра тяжести, то она установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля в данной точке Земли. Геомагнитные полюса не совпадают с географическими. Угол между географическим и магнитным меридианами в любой точке планеты (кроме полюсов) называется *магнитным склонением D*. Если стрелка компаса отклоняется к востоку, то склонение считается положительным, если - к западу, то - отрицательным.

Стрелка, укрепленная на вертикальной оси, расположенной перпендикулярно к географическому меридиану, наклоняется под некоторым углом к горизонтальной поверхности. Этот угол получил название *магнитного наклона* I . Оно положительно, если северный конец стрелки направлен внутрь Земли, и наоборот.

Вектор индукции магнитного поля Земли \vec{B} можно разложить на две составляющие: горизонтальную \vec{B}_0 и вертикальную \vec{B}_z . Если магнитная стрелка может вращаться только вокруг вертикальной оси, то она будет устанавливаться только под действием горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли в плоскости магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая \vec{B}_0 , магнитное склонение D и наклонение I называются *элементами земного магнетизма*. На рис. 2 показано разложение вектора магнитной индукции \vec{B} на ортогональные компоненты X , Y , Z и элементы \vec{B}_0 , D , I для произвольной точки O северного полушария. Установлено, что все показатели земного магнитного поля монотонно изменяются из года в год, из столетия в столетие. Однако магнитное поле Земли может изменяться и за короткое время: от нескольких дней до долей секунды.

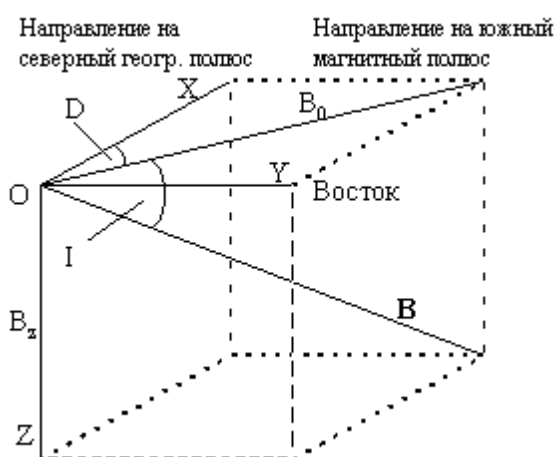


Рисунок 2

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Тангенс-гальванометр.
2. Компас.
3. Амперметр.
4. Реостат.
5. Четырехполюсный переключатель.
6. Проводники.
7. Источник питания.

Рассмотрим круговой проводник (тангенс-гальванометр) из n витков, достаточно плотно прилегающих друг к другу, расположенных вертикально в плоскости магнитного меридиана. В центре проводника поместим магнитную стрелку, вращающуюся вокруг вертикальной оси. Пока ток по катушке

не пропускается, стрелка располагается в плоскости магнитного меридиана (в плоскости катушки). Если по катушке пропустить ток I , то в окружающем катушку пространстве возникает магнитное поле, вектор индукции которого \vec{B}_K будет направлен перпендикулярно к плоскости кругового проводника. Таким образом, на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных поля: магнитное поле Земли (его горизонтальная составляющая \vec{B}_0) и магнитное поле кругового тока \vec{B}_K .

Векторы магнитной индукции этих полей взаимно перпендикулярны. Стрелка устанавливается по направлению результирующего вектора \vec{B}_p вдоль диагонали параллелограмма, сторонами которого будут векторы магнитной индукции \vec{B}_0 и \vec{B}_K .

На рис. 3 показано сечение катушки горизонтальной плоскостью. Вектор \vec{B}_0 - горизонтальная составляющая вектора индукции магнитного поля Земли, \vec{B}_K - вектор индукции магнитного поля катушки.

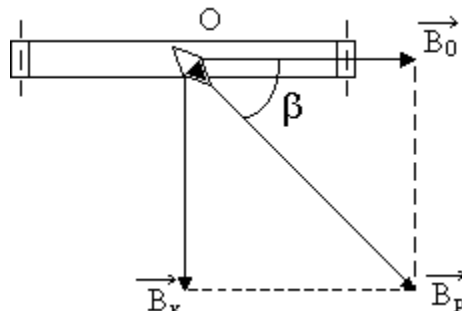


Рисунок 3

Из рисунка видно, что

$$B_K = B_0 \operatorname{tg} \beta. \quad (1)$$

На основании закона Био-Савара-Лапласа значение вектора индукции в центре кругового витка с током вычисляется по формуле

$$B_K = \frac{\mu \mu_0 I n}{2R}, \quad (2)$$

где μ - магнитная проницаемость среды (для воздуха $\mu = 1$); $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная; n - число витков в катушке; R - радиус витка.

Приравняв правые части выражений (1) и (2), получим

$$\frac{\mu_0 n I}{2R} = B_0 \operatorname{tg} \beta,$$

откуда

$$B_0 = \frac{\mu_0 n I}{2R \operatorname{tg} \beta}. \quad (3)$$

Таким образом, зная величину тока, протекающего по катушке, радиус витков и измерив отклонение магнитной стрелки, можно определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Занести в отчет данные электроизмерительных приборов: систему, класс точности, диапазон, число делений шкалы.
2. Выбрать диапазон амперметра. Рассчитать цену деления амперметра.
3. Найти приборную погрешность ΔI_{nm} амперметра и $\Delta \beta_{пр}$ компаса.
4. Проверить электрическую цепь на соответствие ее схеме (рис. 4).

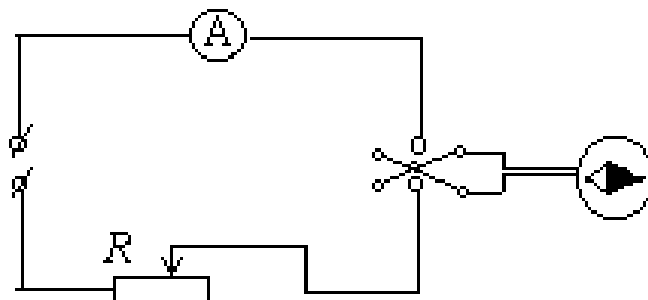


Рисунок 4

5. С помощью реостата установить следующие значения углов отклонения стрелки компаса: 30° , 45° .
6. Снять показания амперметра и занести их в табл. 1.
7. Поменять полярность подаваемого на тангенс-гальванометр напряжения с помощью четырехполюсного переключателя.
8. С помощью реостата установить значения углов отклонения стрелки компаса: -30° , -45° . Показания амперметра занести в табл. 1.
9. Вычислить B_0 - величину горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли по формуле (3) для каждого из углов.
10. С целью уменьшения систематической ошибки¹ найти средние арифметические значения вектора магнитной индукции $\langle B_0 \rangle$ для каждой пары углов 30° и -30° , 45° и -45° соответственно. Средние значения занести в таблицу.
11. Определить абсолютную погрешность

$$\Delta B_0 = \langle B_0 \rangle \left(\frac{\Delta I_{пр}}{I} + \frac{\Delta R_{пр}}{R} + \frac{2\Delta \beta_{пр}}{\sin 2\beta} \right).$$

12. Найти относительную ошибку результата для каждой пары углов по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta B_0}{\langle B_0 \rangle} = \left(\frac{\Delta I_{пр}}{I} + \frac{\Delta R_{пр}}{R} + \frac{2\Delta \beta_{пр}}{\sin 2\beta} \right) \cdot 100\%,$$

где $\Delta \beta_{пр}$ - приборная погрешность компаса, выраженная в радианах.

13. Выбрать из рассчитанных значений B_0 то, которому соответствует меньшая погрешность и для него записать окончательный результат в виде: $B_{0,\text{ист}} = \langle B_0 \rangle + \Delta B_0$. Сделать выводы по работе.¹

Т а б л и ц а 1

β	$\Delta\beta_{\text{пр}},$ рад	I		$\Delta I_{\text{пр}},$ мА	$B_0,$ Тл	$\langle B_0 \rangle,$ Тл	$\Delta B_0,$ Тл	$\varepsilon = \Delta B/B_0$ $\times 100\%$
		дел.	мА					
30°								
-30°								
45°								
-45°								

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое индукция магнитного поля? Единица измерения.
2. Что такое напряжённость магнитного поля? Единица измерения.
3. Что такое магнитный поток? Единица измерения магнитного потока.
4. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
5. Рассчитайте, используя закон Био-Савара-Лапласа, индукцию магнитного поля в центре кругового тока.
6. Объясните причины изменения положения стрелки компаса при включении тангенс-гальванометра.
7. Опишите магнитное поле Земли.

¹ Определяющей ошибкой при расчете горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли методом тангенс-гальванометра является систематическая ошибка, которая может быть связана как с некоторыми недостатками конструкции измерительной установки, так и с несовершенством измерительных приборов. Так, например, на стрелку компаса могут оказывать влияние окружающие посторонние железные предметы, отклоняющие стрелку от положения магнитного меридиана. Размер стрелки и ее положение относительно плоскости кольца должны быть такими, чтобы она целиком помещалась в однородной части магнитного поля колец (для этого ее длина не должна превышать $0.1 R$ колец). Учитывая эти замечания, в работе предлагается рассчитать приборную ошибку результата и сделать это для каждого угла отклонения стрелки компаса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментальное определение удельного заряда электрона.
2. Изучение поведения заряженной частицы в электрическом и магнитных полях.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: Учеб. пособие для студентов вузов.- [В 3-х т.]- Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.- М.: Наука, 1989.- 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. – 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- Академия, 2009. – 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В данной работе отношение для электрона определяется "методом магнетрона". Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей напоминает конфигурацию полей в магнетронах-генераторах электромагнитных колебаний в области сверхвысоких частот.

В работе используется электронная лампа с коаксиальными цилиндрическими катодом и анодом (рис. 1).

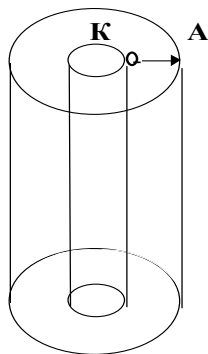


Рисунок 1

Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле параллельно катоду. В отсутствие магнитного поля электрическое поле, перемещая электроны от катода к аноду по радиусу, совершает работу eU (e – заряд электрона, U – разность потенциалов между анодом и катодом), в результате чего электроны приобретают кинетическую энергию

$$eU = mV^2/2. \quad (1)$$

Так как магнитное поле перпендикулярно скорости ($\sin(\vec{V}, \vec{B}) = 1$), то сила Лоренца сообщает электронам нормальное ускорение, изменяющее направление скорости в каждый данный момент времени. Траектория движе-

ния электронов становится криволинейной; кривая начинается на катоде и кончается на аноде. При определенном соотношении между скоростью электронов V и напряженностью магнитного поля электроны перестанут достигать анода и анодный ток в лампе должен прекратиться (рис. 2). Учитывая, что $B = \mu_0 \mu H$ и значение магнитной проницаемости для воздуха $\mu = 1$, запишем второй закон Ньютона для вращательного движения. При $H = H_{кр}$, получим: $e\mu_0 H_{кр} V = \frac{mV^2}{r}$, где r - радиус кривизны траектории электрона.

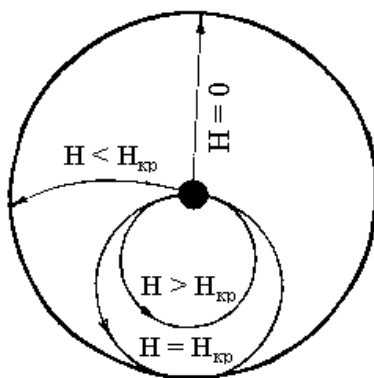


Рисунок 2

Если пренебречь радиусом катода вследствие его малости по сравнению с радиусом анода r_a , то

$$r \approx \frac{r_a}{2}, \text{ т.е. } e\mu_0 H_{кр} = \frac{2mV}{r_a}.$$

Возведем обе части последнего равенства в квадрат и подставим туда V^2 из (1):

$$e^2 \mu_0^2 H_{кр}^2 = \frac{8mU}{r_a^2},$$

откуда

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{\mu_0^2 H_{кр}^2 r_a^2}. \quad (2)$$

Для того чтобы определить $H_{кр}$, нужно построить так зависимость анодного тока I_a от напряженности магнитного поля H .

Если бы все электроны покидали катод с начальной скоростью равной нулю, то анодный ток с увеличением магнитного поля изменялся бы так, как показано на рисунке 3 штриховой линией. На самом деле электроны обладают различными начальными скоростями и кривая $I_a(H)$ имеет вид сплошной линии. В качестве $H_{кр}$ берется значение, соответствующее точке перегиба кривой.

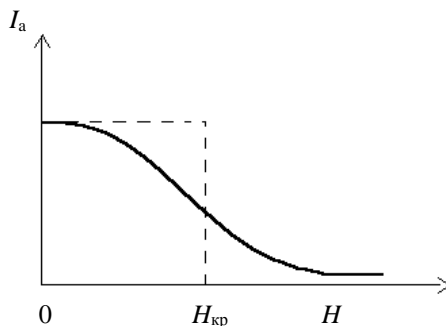


Рисунок 3

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Электронная лампа с цилиндрическим анодом.
2. Соленоид.
3. Амперметр на 1 А.
4. Вольтметр.
5. Потенциометр.
6. Реостат.
7. Миллиамперметр с несколькими диапазонами измерений.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используется диод 2Ц2С, схема включения которого изображена на рис. 4. Лампа помещается в центральной части соленоида, схема питания которого показана на рис. 5.

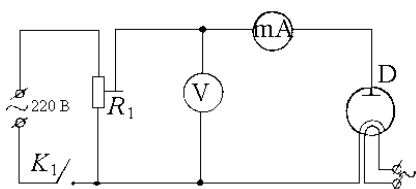


Рисунок 4

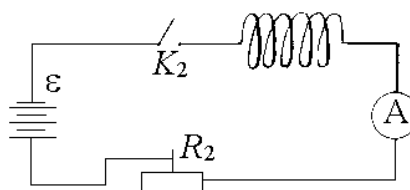


Рисунок 5

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить питание (220 В) и замкнуть ключ K_1 .
2. С помощью потенциометра R_1 установить анодное напряжение 10 В.
3. Замкнуть ключ K_2 .
4. Изменяя с помощью реостата R_2 ток соленоида I_c от 0 до 0,8 А, снять зависимость анодного тока I_a от тока соленоида при постоянном анодном напряжении 10 В, 15 В, 20 В, 25 В.
5. Зависимости $I_a = f(I_c)$ для $U = 10$ В, 15 В снимать при диапазоне измерения миллиамперметра в 1 мА, а для $U = 20$ В и 25 В - при диапазоне 3 мА.
6. Результаты измерений занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

I_c, A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$H, A/m$									
I_a, mA при $U_1 = 10 B$									
I_a, mA при $U_2 = 15 B$									
I_a, mA при $U_3 = 20 B$									
I_a, mA при $U_4 = 25 B$									

7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По формуле $H = I_c N / l$ вычислить H для всех значений I_c . Число витков соленоида $N = 500$ витков, а его длина $l = 0,1$ м.

2. Построить графики зависимости $I_a = f(H)$ для всех измеренных анодных напряжений, определить значения $H_{кр}$ (значение H , при котором наблюдается перегиб кривой).

3. По формуле $\frac{e}{m} = \frac{8U}{\mu_0^2 H_{кр}^2 r_a^2}$ определить удельный заряд электрона для каждого значения $H_{кр}$ (радиус анода $r_a = 0,01$ м, $\mu = 1$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

4. Определить среднее значение $\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle$.

5. Найти для каждого результата абсолютную погрешность.

$$\Delta \frac{e}{m} = \left| \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle - \frac{e}{m} \right|.$$

6. Вычислить среднюю абсолютную погрешность $\left\langle \Delta \frac{e}{m} \right\rangle$ и относитель-

ную погрешность измерений $\varepsilon = \frac{\left\langle \Delta \frac{e}{m} \right\rangle}{\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle} \cdot 100\%$.

7. Результаты вычислений занести в табл. 2.

8. Сравнить полученный результат с теоретическим значением и сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2

№ п/п	$H_{кр},$ А/м	$\frac{e}{m},$ Кл/кг	$\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle,$ Кл/кг	$\Delta \frac{e}{m},$ Кл/кг	$\left\langle \Delta \frac{e}{m} \right\rangle,$ Кл/кг	$\varepsilon, \%$
1						
2						
..						
5						

Дополнительное упражнение

Моделирование траектории электрона в магнетроне

Исследование траектории движения электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях на основе математической модели магнетрона.

Описание модели

Математическая модель движения электрона в магнетроне основана на уравнениях динамики заряженной частицы, на которую действует сила Лоренца в радиальном электрическом и осевом магнитном полях. Электрон начинает движение с поверхности катода, при этом заданы его радиальная V_{0r} и касательная $V_{0\tau}$ компоненты начальной скорости (проекция $V_z = 0$). Параметрами модели являются: радиусы катода и анода R_a ($R_a > R_k$), анодное напряжение U_a и ток соленоида I_C , а также V_{0r} и $V_{0\tau}$.

Программа позволяет построить на экране монитора траекторию (семейство траекторий) электрона в межэлектродном пространстве. Одновременно на экран выводятся установленные значения параметров модели.

Порядок выполнения упражнения

1. Включить персональный компьютер и загрузить программу построения траектории электрона.

2. Ввести значения варьируемых параметров задачи согласно указанным пределам и рекомендуемым значениям:

R_k - радиус катода, мм,

R_a - радиус анода, мм,

n - число витков соленоида на единицу длины, m^{-1} ,

U_a - анодное напряжение, В,

I_C - ток соленоида, А,

V_{0r} - начальная радиальная скорость электрона, м/с,

$V_{0\tau}$ - начальная касательная скорость электрона, м/с.

3. Провести наблюдение траекторий электрона для установленных значений параметров модели и проследить характер изменений траектории при варьировании U_a и I_C . По указанию преподавателя распечатать (зарисовать) полученные траектории.

Обратить внимание на изменения кривизны траектории по мере удаления электрона от катода.

4. Для одного из значений U_a (при параметрах модели, соответствующих используемому в экспериментальной установке магнетрону) подобрать значение I_c , при котором траектория практически касается анода. Сравнить полученное значение критического тока соленоида с результатами эксперимента.

5. Сделать выводы по работе.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите поведение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях с выводом параметров траектории частицы.

2. Выведите расчетную формулу для удельного заряда.

3. Опишите другие способы определения удельного заряда частиц.

4. Запишите выражение для силы Лоренца в векторной форме и укажите, как определяется направление этой силы.

5. Объясните, как изменилась бы форма траектории, если бы заряженная частица имела вдвое большую массу, вдвое больший заряд?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование эффекта Холла и определение типа, концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводнике.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Суть эффекта Холла заключается в следующем: если через металлическую или полупроводниковую пластинку, помещенную в магнитное поле, пропустить постоянный ток плотностью \vec{j} , направление которого перпендикулярно вектору \vec{B} , то на ее плоскостях в направлении, перпендикулярном \vec{j} и \vec{B} , возникнет разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$. Появление поперечной разности потенциалов на проводнике с током в магнитном поле называется эффектом Холла (рис. 1).

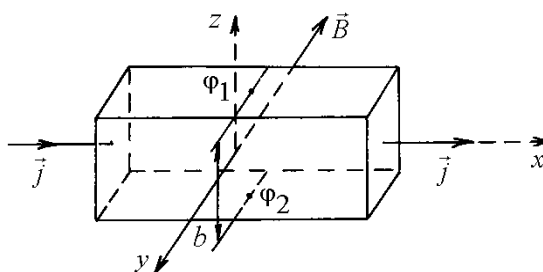


Рисунок 1

Холловская разность потенциалов определяется выражением

$$U_H = Rb j B, \quad (1)$$

где b - расстояние между рассматриваемыми параллельными гранями проводника; j - плотность тока; B - магнитная индукция поля; R - коэффициент пропорциональности (постоянная Холла).

Простейшая микроскопическая теория эффекта Холла основана на представлении о свободных носителях заряда в проводнике. Рассмотрим проводник в форме прямоугольной пластинки, через которую течет ток плотностью j (рис. 2).

В отсутствие магнитного поля ток в пластинке обусловлен электрическим полем \vec{E}_o , создаваемым внешним источником. Эквипотенциальные поверхности этого поля образуют систему перпендикулярных к вектору \vec{E}_o плоскостей. Две из них изображены на рис. 2 сплошными линиями. По-

тенциал в любой точке каждой из плоскостей, а, следовательно, и в точках 1 и 2, одинаков. Поскольку носители заряда - электроны имеют отрицательный заряд, то скорость их упорядоченного движения V направлена противоположно вектору плотности тока \vec{j} .

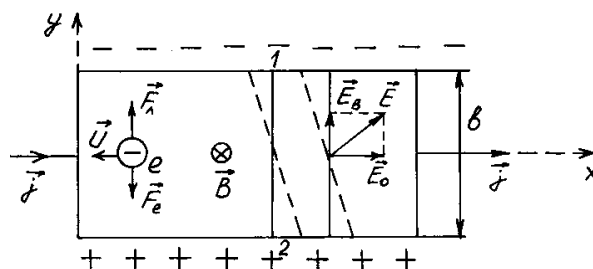


Рисунок 2

При появлении магнитного поля, перпендикулярного направлению тока, каждый носитель отрицательного заряда оказывается под воздействием силы Лоренца, действующей со стороны магнитного поля и направленной, как показано на рис. 2, вдоль оси Y вверх:

$$\vec{F}_L = e[\vec{V} \times \vec{B}] \quad (2)$$

или в скалярной форме:

$$F_L = e \cdot \langle V \rangle \cdot B. \quad (3)$$

В результате у электронов появляется составляющая скорости, направленная к верхней границе пластины. У этой грани образуется избыток отрицательных зарядов, у нижней, соответственно, их недостаток. Следовательно, возникает дополнительное поперечное электрическое поле \vec{E}_b и сила ($e\vec{E}_b$), действующая на носители тока в направлении, противоположном силе Лоренца. При равенстве этих сил устанавливается стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Соответствующее значение \vec{E}_b определяется условием

$$F_L = F_e,$$

или

$$e \cdot \langle V \rangle \cdot B = eE_b,$$

откуда

$$E_b = \langle V \rangle B. \quad (4)$$

Поле \vec{E}_b складывается с полем \vec{E}_0 , образуя результирующее поле \vec{E} . Поскольку эквипотенциальные поверхности должны оставаться перпендикулярными вектору напряженности поля, они займут положение, изображенное на рис. 2 пунктиром. Точки 1 и 2, которые прежде лежали на одной и той же эквипотенциальной поверхности, теперь имеют разные потенциалы. Разность потенциалов между точками 1 и 2 связана с напряженностью поля \vec{E}_b соотношением

$$U_{1,2} = b E_b = b \cdot \langle V \rangle \cdot B. \quad (5)$$

Учитывая, что средняя скорость упорядоченного движения носителей заряда связана с плотностью тока соотношением

$$j = e n \langle V \rangle, \text{ или } \langle V \rangle = j/en, \quad (6)$$

находим

$$U_{1,2} = \frac{j b B}{en}. \quad (7)$$

Полученная формула совпадает с выражением (1), если положить

$$R = \frac{1}{en}. \quad (8)$$

Таким образом, постоянная Холла зависит от концентрации носителей заряда. Определив экспериментально R , можно найти и концентрацию носителей заряда.

Важной характеристикой проводника является подвижность в нем носителей заряда. Подвижностью носителей заряда называется средняя скорость, приобретаемая носителями в электрическом поле, напряженность которого равна единице:

$$\langle V_0 \rangle = \frac{\langle V \rangle}{E}. \quad (9)$$

Подвижность можно связать с проводимостью σ и концентрацией носителей заряда. Действительно, $j = e n \cdot \langle V \rangle$. Поделим обе части равенства на напряженность поля E :

$$\frac{j}{E} = \frac{\langle V \rangle}{E} en.$$

Приняв во внимание, что $\frac{j}{E} = \sigma$ и $\frac{\langle V \rangle}{E} = \langle V_0 \rangle$, получим

$$\sigma = e n \langle V_0 \rangle. \quad (10)$$

Измерив постоянную Холла и проводимость σ , можно по формулам (8) и (10) найти концентрацию и подвижность носителей тока в образце.

Нетрудно видеть, что знак поперечной разности потенциалов $U_{1,2}$ зависит от знака движущихся зарядов. На рис. 3 показан эффект Холла для образцов с положительными и отрицательными зарядами.

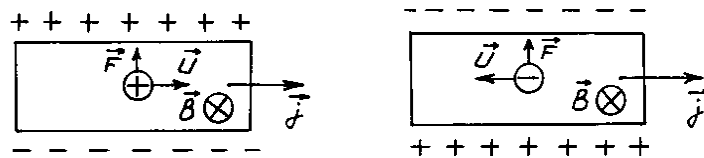


Рисунок 3

Направление магнитной силы изменяется на противоположное, как при изменении направления движения заряда, так и при изменении его знака. Следовательно, для двух разных образцов при одинаковом направлении тока и поля, магнитная сила, действующая на положительные и отрицательные носители, имеет одинаковое направление. Поэтому, в случае положительных носителей потенциал верхней (рис. 3) грани, выше, чем нижней, а в случае

отрицательных носителей - ниже. Таким образом, определив знак холловской разности потенциалов, можно установить знак носителей заряда.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Датчик Холла.
2. Миллиамперметр.
3. Реостат.
4. Источник постоянного тока.
5. Электромагнит.
6. Регулируемый источник постоянного тока питания электромагнита.
7. Милливольтметр.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемые приборы показаны на рис. 4. Датчик Холла расположен между полюсными наконечниками - концентраторами магнитного поля. Обмотка электромагнита подключена к источнику постоянного тока с регулируемым напряжением. Путем регулировки тока в обмотке электромагнита устанавливается необходимое значение индукции B в зазоре между его полюсами. В продольном направлении через датчик Холла пропускают ток, величину которого устанавливают с помощью реостата 3 и измеряют с помощью миллиамперметра 2. Величина тока I не должна превышать 3 мА. В поперечном направлении к контактам датчика Холла подключен милливольтметр 7, который определяет разность потенциалов U_H . Применяемая конструкция датчика Холла не имеет выводов для компенсации начальной разности потенциалов, поэтому даже при отсутствии внешнего магнитного поля и небольшом продольном токе I через образец, существует некоторая поперечная разность потенциалов U_0 , не связанная с эффектом Холла.

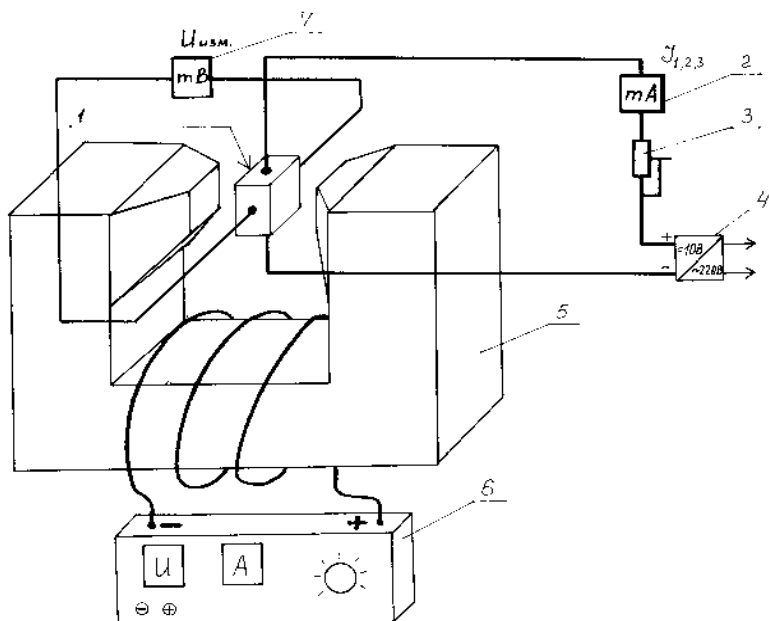


Рисунок 4

Разность потенциалов, связанную с эффектом Холла определяют при наличии магнитного поля и тока через образец как разницу между измеренным значением разности потенциалов U_3 и начальным значением U_0 при данном токе через образец

$$U_H = U_3 - U_0. \quad (11)$$

Таким образом, расчетным путем компенсируется начальная разность потенциалов, не обусловленная эффектом Холла. Величина U_0 различна для различных значений тока I через датчик и может обозначаться как U_{01} , U_{02} , U_{03} и т.д. Следует отметить, что прибор 7 имеет невысокое входное сопротивление, поэтому его показания нельзя принимать за ЭДС Холла. Чтобы рассчитать ЭДС Холла, необходимо воспользоваться законом Ома для полной цепи, приняв внутреннее сопротивление образца $r = 200$ Ом. Например, если в результате эксперимента определено значение $U_H = 200$ мВ, $I = 0,2$ мА, то зная сопротивление внешней цепи, т.е. прибора ($R_{\text{п}} = 1000$ Ом), можно определить ЭДС Холла по формуле

$$\text{ЭДС}_H = I \cdot (R_{\text{п}} + r) = 0,2 \cdot (1000 + 200) = 240 \text{ мВ},$$

где I - ток (в мА) отклонения прибора, соответствующий приложенной разности потенциалов. Величина этого тока, взятая в мкА, численно совпадает с величиной поперечной разности потенциалов, взятой в мВ. Это обусловлено особенностями построения шкалы измерительного прибора, что и позволило непосредственно использовать это числовое значение для подстановки в формулу определения ЭДС Холла, но с изменением ее размерности.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять вольтамперную характеристику датчика Холла $I = f(U)$ при отсутствии магнитного поля и значениях питающего напряжения $U_{\text{п}}$ датчика, указанных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

$U_{\text{п}}, \text{В}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I, \text{мА}$										

2. Построить график зависимости $I = f(U)$.

3.1. Определить разность потенциалов Холла U_x в зависимости от магнитной индукции B при трех значениях тока I через датчик: $I_1 = 1$ мА, $I_2 = 2$ мА, $I_3 = 3$ мА.

3.2. Установить значение тока через датчик $I_1 = 1$ мА и при $B = 0$ определить остаточное напряжение U_{01} в датчике при данном токе.

3.3. Установить различные значения индукции магнитного поля B путем изменения напряжения питания электромагнита (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

$U_{\text{м}}, \text{В}$	0	4	8	12	16	20	24
$I_{\text{м}}, \text{А}$	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$B, \text{Тл}$	0	1	2	3	4	5	6

3.4. Для каждого значения индукции магнитного поля B определить напряжение U_3 , возникающее на датчике Холла, и занести в табл. 3.

$$I_1 = 1 \text{ мА}$$

Т а б л и ц а 3.1

B , Тл	0	1	2	3	4	5	6	7
U_3 , мВ								
$U_H = U_3 - U_{01}$, мВ								

$$I_1 = 2 \text{ мА}$$

Т а б л и ц а 3.2

B , Тл	0	1	2	3	4	5	6	7
U_3 , мВ								
$U_H = U_3 - U_{01}$, мВ								

$$I_1 = 3 \text{ мА}$$

Т а б л и ц а 3.3

B , Тл	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
U_3 , мВ								
$U_H = U_3 - U_{01}$, мВ								

3.5. Вычислить значения разности потенциалов Холла как разность $U_3 - U_{01}$ и занести в табл. 3.

4. Аналогичные измерения произвести для $I_2 = 2 \text{ мА}$, $I_3 = 3 \text{ мА}$, повторив п.п. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4. Данные занести в табл. 3.

5. Построить графики зависимости $U_H = f(B)$ для I_1 , I_2 и I_3 .

6. Рассчитать постоянную Холла по формуле

$$R = \frac{U_x \cdot b}{I \cdot B},$$

где $b = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

7. Рассчитать концентрацию носителей заряда $n = \frac{3\pi}{8Re}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

8. Рассчитать подвижность носителей тока $\sigma = \frac{8R}{3\rho}$, где $\rho = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ - удельное сопротивление проводника.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите поведение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.

2. Запишите выражение для силы Лоренца и укажите направление этой силы.

3. Объясните механизм возникновения холловской разности потенциалов.

4. Объясните эффект Холла с позиций электронной теории.

5. Что такое «подвижность носителей заряда»?

6. Как связана подвижность носителей заряда с проводимостью σ и концентрацией n ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Снятие основной кривой намагничивания.
2. Построение зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
3. Определение остаточной индукции B_0 и коэрцитивной силы H_0 ферромагнетиков.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Черкашин В.П. Физика. Электричество и магнетизм. - Киев: Выща шк., 1986. - 168 с.
3. Практикум по физике / Под. ред. Ф.А. Николаева.- М.: Высш. шк., 1991. - 151 с.
4. Чолпан П.П. Основи фізики: навч. посібник.- Киев: Выща шк., 1995.- 488 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

По магнитным свойствам физические тела можно разделить на три класса: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетики характеризуются относительной магнитной проницаемостью $\mu \leq 1$, т.е. эти тела, внесенные в магнитное поле, ослабляют его. К диамагнетикам относятся инертные газы, дистиллированная вода, медь, золото, серебро, цинк, висмут, т.е. тела, атомы и молекулы которых характеризуются близким к нулю магнитным моментом в отсутствии магнитного поля.

Парамагнетики характеризуются $\mu \geq 1$. Они несколько усиливают магнитное поле, обычно на сотые доли процента, если их внести в это поле. Атомы парамагнетиков имеют небольшой магнитный момент и в отсутствии магнитного поля. К парамагнетикам относятся щелочные металлы, алюминий, кислород, азот.

Наиболее ярко магнитные свойства проявляются у ферромагнетиков, для которых $\mu \gg 1$, то есть при внесении во внешнее магнитное поле они усиливают его во много раз. К ферромагнетикам относятся железо и его сплавы, в том числе широко используемые в постоянных магнитах алюминиево-никелевые стали, никель, кобальт, полупроводниковые соединения типа $MeO \cdot Fe_2O_3$, называемые ферритами, используемые в радиоэлектронике и элементах вычислительной техники.

Теория ферромагнетизма может быть вкратце сведена к следующим положениям: в ферромагнетиках при температурах, не превышающих критических значений, характерных для каждого типа ферромагнетика и называемых

точкой Кюри (например, для железа точка Кюри равна 770°C), существуют небольшие области с размерами $10^{-4} \dots 10^{-6}$ м, самопроизвольно намагниченные до насыщения, это - магнитные домены. Магнитные моменты различных доменов в отсутствии внешнего магнитного поля ориентированы хаотично, поэтому весь ферромагнетик в целом практически не обладает магнитным моментом, намагниченность его близка к нулю.

Причиной образования доменов является взаимодействие собственных (спиновых) магнитных моментов электронов в атомах ферромагнетиков, приводящее к ориентации их моментов в одном направлении. Поскольку энергия магнитного поля возрастает пропорционально квадрату магнитного момента, то энергетически невыгодно, чтобы все тело, либо его крупные части, были намагничены в одном направлении, именно поэтому происходит дробление магнетика на домены, сравнительно небольшие магнитные моменты, которые компенсируют друг друга.

Совершенно отличной от других магнетиков является зависимость вектора намагниченности ферромагнетика \vec{I} и магнитной индукции \vec{B} от напряженности внешнего магнитного поля \vec{H}

$$\vec{J} = (\mu - 1)\vec{H} = \chi\vec{H}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \vec{H}, \quad (2)$$

где χ - магнитная восприимчивость ферромагнетика; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

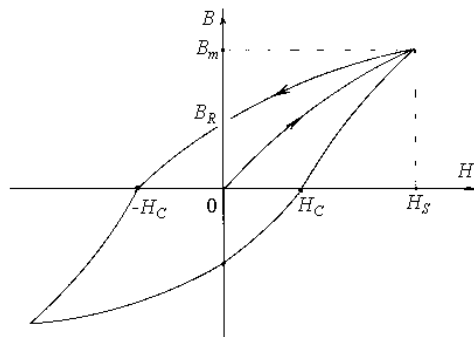


Рисунок 1

Эти зависимости носят нелинейный характер и образуют кривую, называемую петлей гистерезиса (от греческого - запаздывание). На рис. 1 показан общий вид зависимости $B = f(H)$.

При увеличении напряженности магнитного поля до некоторого значения H_S наступает предельное значение B_m при полном, насыщающем значении намагниченности тела сердечника J_S . При уменьшении напряженности магнитного поля до нуля, образец сохраняет остаточную магнитную индукцию B_R (остаточную намагниченность J_R). Это свойство ферромагнетиков используется в элементах памяти вычислительных машин и в постоянных магнитах.

Если изменить направление магнитного поля на противоположное первоначальному, то при значении напряженности $-H_C$ намагниченность тела сердечника обращается в нуль. Такое значение напряженности магнитного

поля, при котором остаточная намагниченность исчезает, называется коэрцитивной силой. Магнитотвердые материалы характеризуются коэрцитивной силой $H_C > 400 \text{ А/м}$, а магнитомягкие характеризуются $H_C < 10 \text{ А/м}$. Площадь петли гистерезиса пропорциональна работе по перемагничиванию единицы объема ферромагнетика. Поэтому понятно, что магнитомягкие материалы, характеризующиеся узкой петлей гистерезиса, используются в сердечниках трансформаторов, то есть там, где надо снижать потери энергии на перемагничивание, а магнитотвердые стали используются в постоянных магнитах.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Тороидальный трансформатор.
2. Электронный осциллограф.
3. Понижающий трансформатор 220/42.
4. Источник питания (УИП-2, или делитель напряжения).

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема лабораторной установки для изучения ферромагнетиков в переменном магнитном поле изображена на рисунке 2. В качестве исследуемого образца используется ферромагнитный сердечник тороидального трансформатора T , первичная обмотка которого питается от потенциометра $R_{\text{п}}$, подключенного к источнику переменного напряжения $U = 42 \text{ В}$. Возникающий при этом ток I_1 создает на сопротивлении R_1 падение напряжения U_x , связанное с напряженностью переменного магнитного поля H трансформатора T соотношением

$$H = \frac{N_1}{l_1} \cdot I_1 = \frac{N_1}{l_1} \cdot \frac{U_x}{R_1} = K_1 U_x, \quad K_1 = \frac{N_1}{l_1 R_1}, \quad (3)$$

где l_1 - длина первичной обмотки трансформатора T (средняя длина тороидального сердечника); I_1 - сила тока, намагничивающего образец; N_1 - число витков первичной обмотки.

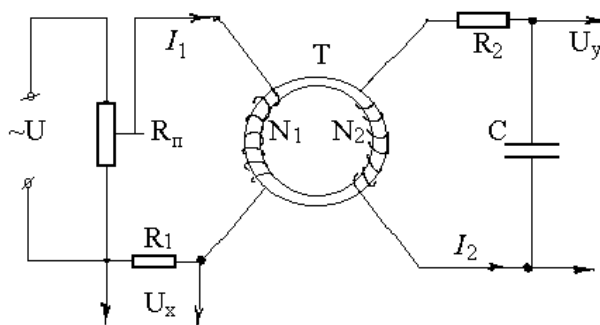


Рисунок 2

Таким образом, на вход X осциллографа подается напряжение U_x , пропорциональное напряженности H магнитного поля тороидального трансформатора T .

Для измерения магнитной индукции B в ферромагнитном сердечнике тороидального трансформатора T применяется метод, основанный на законе электромагнитной индукции

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Поскольку потокосцепление определяется как

$$\Phi = BS N_2,$$

где S - сечение тороида; N_2 - число витков вторичной обмотки трансформатора T , то

$$\frac{dB}{dt} = \frac{|E_2|}{N_2 S}.$$

Следовательно, напряжение во вторичной обмотке пропорционально производной $\frac{dB}{dt}$. Для того чтобы подать на вход Y осциллографа напряжение

U_y , пропорциональное B , необходимо между вторичной обмоткой трансформатора T и входом Y осциллографа включить интегрирующую цепочку $R_2 C$ (рисунок 2). Действительно, преобразовав предыдущее выражение, получим

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int_0^t |E_2| dt, \quad (4)$$

$$E_2 = I_2 \cdot \sqrt{R_2^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - \text{закон Ома для переменного тока,}$$

где I_2 - ток во вторичной обмотке трансформатора T ; R_2 - активное сопротивление (рис. 2).

ЭДС самоиндукции вторичной обмотки считаем незначительной, т.к. число витков невелико.

R_2 и C подобраны таким образом, что индуктивное и емкостное сопротивления пренебрежимо малы по сравнению с активным R_2 , тогда $E_2 = I_2 R_2$ и

$$B = -\frac{R_2}{N_2 S} \int_0^t I_2 dt, \quad (5)$$

где $\int_0^t I_2 dt = q$ - величина заряда на обкладках конденсатора C . Следовательно,

$$q = C U_y, B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y = K_2 U_y, K_2 = \frac{R_2 C}{N_2 S}.$$

Таким образом, напряжение U_y на конденсаторе C , подаваемое на вход Y осциллографа, пропорционально индукции магнитного поля B в ферромагнитном сердечнике тороидального трансформатора T .

При подаче напряжения U_x на горизонтально отклоняющие пластины, а U_y - на вертикально отклоняющие пластины происходит сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний электронного луча. В результате за полный период колебаний луч воспроизводит на экране осциллографа в определенном масштабе петлю гистерезиса, которая может служить основой для изучения магнитных характеристик ферромагнетиков.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

а) Подготовка установки к измерениям

1. Включить осциллограф, прогреть его 5...7 минут.
2. Установить ручки управления усилением входных сигналов осциллографа по осям "X" и "Y" в нулевое положение.
3. Электронный луч осциллографа сфокусировать в центр экрана.
4. Включить рабочую установку через понижающий трансформатор 220/42 в сеть и подключить ее к осциллографу. Напряжения установки U_x и U_y подать соответственно к входам X и Y осциллографа (при этом клеммы "Земля" осциллографа и установки соединяются между собой).
5. Ручку потенциометра R_n установить в положение, соответствующее максимальному напряжению на первичной обмотке трансформатора T и получению насыщенной петли гистерезиса на экране осциллографа.
6. Ручками "Усиление" и "Синхр" добиться оптимального расположения насыщенной петли гистерезиса на экране осциллографа (при дальнейших измерениях эти ручки не трогать).

б) Проведение измерений

1. Измерить (в делениях шкалы по осям X и Y) коэрцитивную силу $H_0 \left(x_0 = \frac{l_{0x}}{2} \right)$ и остаточную магнитную индукцию $B_0 \left(y_0 = \frac{l_{0y}}{2} \right)$ на полученной петле гистерезиса (l_{0x} и l_{0y} - длины сечения площади петли осью X и Y). Результаты измерений занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

$x_0 = \frac{l_{01}}{2},$ дел.	$U_{0x}, В$	$H_0, А/м$	$y_0 = \frac{l_{0y}}{2},$ дел.	$U_{0y}, В$	$B_0, Тл$

2. Отключив усиление по оси Y (отсоединить установку от входа "Усиление Y" осциллографа), измерить длину отрезка l_{x1} , соответствующего сигналу на входе X. Тоже произвести с усилением по оси X, измерив длину отрезка l_{y1} по оси Y. Измеренные значения x_1 и y_1 занести в табл. 2 (столбец "насыщение", $x_1 = \frac{l_{x1}}{2}, y_1 = \frac{l_{y1}}{2}$).

3. Уменьшая петлю гистерезиса с помощью потенциометра R_n установки, провести такие же измерения l_{xi} и l_{yi} для 5 различных петель. Занести значения $x_i = \frac{l_{xi}}{2}, y_i = \frac{l_{yi}}{2}$ в табл. 2.

4. Произвести градуировку осциллографа по пункту в).

3. Уменьшая петлю гистерезиса с помощью потенциометра R_n установ-

ки, провести такие же измерения l_{xi} и l_{yi} для 5 различных петель. Занести значения $x_i = \frac{l_{xi}}{2}$, $y_i = \frac{l_{yi}}{2}$ в табл. 2.

4. Произвести градуировку осциллографа по пункту в).

Т а б л и ц а 2

i	Насы- щение	Д о н а с ы щ е н и я					
	1	2	3	4	5	6	7
$x_i = \frac{l_{xi}}{2}$							
U_{xi} (В)							
H_i (А/м)							
$y_i = \frac{l_{yi}}{2}$							
U_{yi} (В)							
B_i (Тл)							
μ							

в) Градуировка экранной сетки осциллографа

1. Отключить рабочую установку от осциллографа.

Т а б л и ц а 3

i	1	2	3	4	5	6
U_{xi} (В)						
$x_i = \frac{l_{xi}}{2}$						
U_{yi} (В)						
$y_i = \frac{l_{yi}}{2}$						

2. Подать на “Вход X” напряжение U_{xi} от источника постоянного тока (делителя) и замерить длину l_{xi} соответствующего ему сигнала на экранной сетке осциллографа. Результаты измерений $x_i = \frac{l_{xi}}{2}$ и U_{xi} занести в табл. 3 и построить градуировочный график $x_i = f(U_{xi})$.

3. Аналогичные измерения провести по оси Y, подавая напряжения U_{yi} на “Вход Y” и замеряя длину l_{yi} . Результаты $y_i = \frac{l_{yi}}{2}$ и U_{yi} занести в табл. 3 и построить зависимость $y_i = f(U_{yi})$.

г) Обработка результатов измерений

1. Рассчитать напряженность H_i и магнитную индукцию B_i по формулам

$$H_i = k_1 U_{xi}, \quad k_1 = \frac{N_1}{lR_1};$$

и

$$B_i = k_2 U_{yi}, \quad k_2 = \frac{R_2 C}{N_2 S}.$$

Результаты расчетов занести в табл. 2. $H_0 = k_1 U_{0x}$, $B_0 = k_2 U_{0y}$ - занести в табл. 1.

2. Построить основную кривую намагничивания $B_i = f(H_i)$ по данным табл. 2.

3. Рассчитать относительное значение магнитной проницаемости по формуле $\mu_i = \frac{B_i}{H_i \mu_{0i}}$, занести эти значения в табл. 2 и построить график зависимости $\mu_i = f(H_i)$.

4. По графику $\mu_i = f(H_i)$ определить максимальное значение магнитной проницаемости μ_{\max} и ее начальное значение $\mu_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu_0}$ (α определяется по наклону касательной, проведенной в начальной точке кривой $B_i = f(H_i)$).

5. Полученные характеристики ферромагнетика занести в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Данные	μ_{\max}	μ_1	H_0 , А/м	B_0 , Тл
Лабораторные				
Справочные				
Отклонение				

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение напряженности и индукции магнитного поля. Какова связь между ними?

2. Дайте определение магнитной проницаемости. Дайте классификацию магнетиков: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

3. Объясните поведение ферромагнетика в переменном магнитном поле (магнитный гистерезис).

4. Объясните, от чего зависит площадь петли гистерезиса.

5. Объясните образование остаточной намагниченности.

6. Перечислите основные характеристики ферромагнетиков, их определение с помощью петли гистерезиса.

7. Опишите принципиальную схему установки для изучения явления гистерезиса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ
И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Изучение явления самоиндукции.
2. Определение индуктивности катушки без сердечника и с ферромагнитным сердечником.
3. Проверка закона Ома для электрической цепи переменного тока.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов.- [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При изменении силы тока в проводящем контуре изменяется величина магнитного потока, сцепленного с этим контуром. Следовательно, в последнем, согласно закону Фарадея, будет индуцироваться электродвижущая сила E_s (ЭДС) Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется самоиндукцией. ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре

$$E_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью или коэффициентом самоиндукции и измеряется в генри (Гн). Индуктивность контура является мерой его "инертности" по отношению к изменению силы тока в нем и зависит от размеров контура, его геометрической формы, плотности намотки проводника и относительной магнитной проницаемости среды μ , из которой изготовлен сердечник.

Если электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные резистор с омическим или активным сопротивлением R , катушку индуктивности L и конденсатор емкости C , подключить к источнику переменного напряжения, то в такой цепи возникнет переменный электрический ток (рис. 1).

Пусть напряжение источника изменяется по гармоническому закону

$$U = U_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

где U_0 - амплитудное значение напряжения.

Тогда ток в цепи будет равен

$$I = I_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (3)$$

где I_0 - амплитудное значение силы тока; φ - разность (сдвиг) фаз между приложенным напряжением и силой тока.

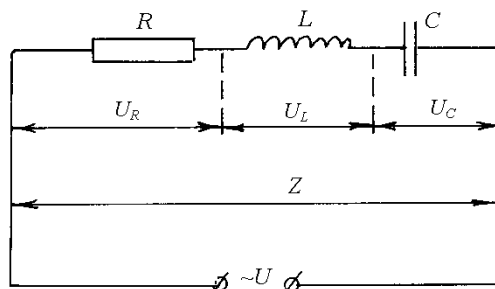


Рисунок 1

Падения напряжения на отдельных участках цепи определяются соотношениями

$$\begin{aligned} U_R &= IR, \\ U_L &= I\omega L, \\ U_C &= \frac{I}{\omega C} \end{aligned} \quad (4)$$

где ω - циклическая частота ($\omega = 2\pi\nu$); R – активное сопротивление; $R_L = \omega L$ - индуктивное сопротивление; $R_C = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление.

В цепи переменного тока имеет место сдвиг по фазе между U_R , U_L и U_C , что можно представить на векторной диаграмме (рис. 2). Колебания напряжения на емкости отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$, а колебания напряжения на индуктивности опережают колебания силы тока на $\pi/2$. Напряжение на активном сопротивлении изменяется в фазе с током.

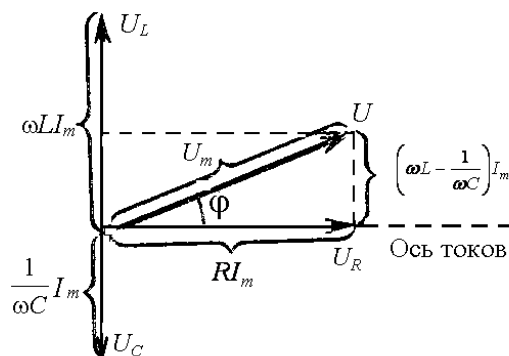


Рисунок 2

Эффективные или действующие значения силы тока I_δ и напряжения U_δ связаны с амплитудными значениями переменного тока I_0 и U_0 соотношениями

$$I_\delta = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, U_\delta = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Закон Ома для RLC – цепи (рис. 1) имеет вид

$$I_\delta = \frac{U_\delta}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_\delta}{Z}, \quad (6)$$

где

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (7)$$

- полное электрическое сопротивление (или импеданс);

R - активное (или омическое) сопротивление;

$$R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

- реактивное сопротивление (или реактанс).

Сдвиг по фазе между током в цепи и приложенным напряжением (рис. 2) определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (9)$$

В частном случае, если цепь переменного тока содержит лишь резистор R и катушку индуктивности L , формула (6) имеет вид

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

где $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = Z$, откуда

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}. \quad (10)$$

Таким образом, для определения индуктивности катушки необходимо знать ее полное сопротивление Z , активное сопротивление R и циклическую частоту ω переменного тока, которая связана с обычной частотой ν соотношением $\omega = 2\pi\nu$. Для промышленного тока частота $\nu = (50 \pm 1)$ Гц.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Катушка индуктивности.
2. Ферромагнитный сердечник.
3. Конденсатор.
4. Реостат.
5. Вольтметр.
6. Амперметр.
7. Источник переменного напряжения.
8. Мост постоянного тока.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1

Определение индуктивности катушки

1. Измерить с помощью моста постоянного тока активное сопротивление катушки R и определить погрешность ΔR .

$$L = \langle L \rangle \pm \langle \Delta L \rangle \text{ (Гн)}; \varepsilon = \frac{\langle \Delta L \rangle}{\langle L \rangle} 100\% \text{ - без сердечника};$$

$$L = \langle L \rangle \pm \langle \Delta L \rangle \text{ (Гн)}; \varepsilon = \frac{\langle \Delta L \rangle}{\langle L \rangle} 100\% \text{ - с сердечником.}$$

Упражнение 2

Проверка закона Ома для цепи переменного тока

1. Выполнить п.п. 1 и 2 упражнения 1.
2. Собрать схему (рис. 4). Здесь A и V - амперметр и вольтметр, L - катушка индуктивности, C - конденсатор, R_n - потенциометр. К клеммам ab приложено переменное напряжение 220 В.

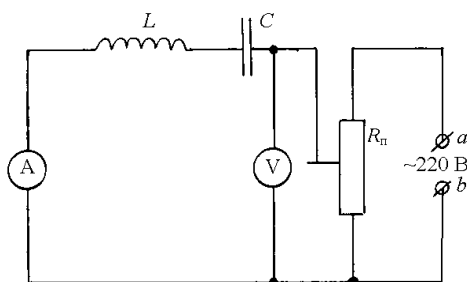


Рисунок 4

3. Замкнуть цепь и определить силу тока для трех различных значений напряжений U_0 на ее концах.

Вычислить Z по формуле $Z = \frac{U_0}{I_0}$ и найти среднее значение $\langle Z \rangle$.

Вычислить абсолютную погрешность ΔZ по формуле

$$\Delta Z = \langle Z \rangle \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right),$$

где ΔU и ΔI - соответственно приборные погрешности вольтметра и амперметра.

Результаты вычислений записать в виде:

$$Z = \langle Z \rangle \pm \langle \Delta Z \rangle \text{ (Ом)},$$

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta Z \rangle}{\langle Z \rangle} \cdot 100\%$$

4. Вычислить Z по формуле (7) и записать результат.
5. Сравнить результаты п.п. 3 и 4 и сделать вывод.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните, в чем состоит явление электромагнитной индукции, самоиндукции и взаимной индукции.
2. Сформулируйте и запишите основной закон электромагнитной индукции, ЭДС самоиндукции.
3. Дайте определение индуктивности.

4. Сформулируйте правило Ленца.
5. Дайте определение действующих значений напряжения и силы переменного тока.
6. Напишите формулы импеданса, реактанса цепи.
7. Дайте определение диа-, пара- и ферромагнетиков.
8. Объясните, в какую сторону и почему изменятся показания амперметра, если при неизменном напряжении в катушку ввести сердечник из: а) диамагнетика; б) парамагнетика; в) ферромагнетика?
9. Изобразите векторную диаграмму и с ее помощью определите сдвиг по фазе между током в RLC -цепи и напряжением на ее концах.
10. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока, содержащей RLC -участки. Рассмотрите частные случаи.
11. Получите формулу для определения абсолютной погрешности ΔL .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12**ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАМЫКАНИИ
И РАЗМЫКАНИИ ЦЕПИ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Изучение экстратоков замыкания и размыкания цепи.
2. Определение индуктивности соленоида без сердечника и с сердечником.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электродвижущая сила \mathcal{E}_i , которая приводит к возникновению тока в контуре. Это явление получило название *явления электромагнитной индукции*. ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока и не зависит от способа, которым осуществляется это изменение:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_m}{dt}. \quad (1)$$

Знак "минус" в формуле является математическим выражением *правила Ленца*, согласно которому индукционный ток в контуре имеет такое направление, чтобы создаваемое им магнитное поле препятствовало изменению магнитного поля, вызвавшего этот индукционный ток.

Если ЭДС индукции вызвана изменением магнитного потока, созданного меняющимся током в самом замкнутом контуре, то это явление называется *самоиндукцией*.

Индукция B магнитного поля тока I пропорциональна величине этого тока, поэтому и магнитный поток, создаваемый током, пропорционален ему

$$\Phi_m = LI. \quad (2)$$

Коэффициент L называется индуктивностью контура или коэффициентом самоиндукции. За единицу индуктивности 1 Генри принимается индуктивность такого проводника, у которого при силе тока в нем в 1А возникает сцепленный с ним магнитный поток 1 Вебер.

Индуктивность контура зависит от его геометрии (размеров и формы) и магнитных свойств среды (μ).

Индуктивность достаточно длинного соленоида

$$L = \mu_0 \mu n^2 l S = \mu_0 \mu n^2 V, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная; μ - магнитная проницаемость среды, заполняющей объем соленоида; n - число витков на единицу длины соленоида; V - объем соленоида.

С учетом (1) и (2) имеем для ЭДС самоиндукции контура

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right). \quad (4)$$

Если индуктивность контура остается неизменной, то имеем

$$\mathcal{E}_s = -L\frac{dI}{dt}. \quad (5)$$

Экстратоки размыкания и замыкания

При замыкании цепи ток самоиндукции препятствует нарастанию основного тока, поэтому ток устанавливается не мгновенно, а при размыкании он падает постепенно, так как ток самоиндукции сонаправлен с основным током.

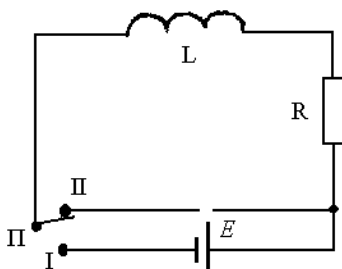


Рисунок 1

Размыкание цепи. Пусть в цепи с индуктивностью L , омическим сопротивлением R и источником ЭДС \mathcal{E} течет ток $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$. В момент времени $t = 0$ отключим источник питания, поставив переключатель Π в положение II. Как только сила тока в цепи начнет убывать, возникнет ЭДС самоиндукции, препятствующая этому:

$$\mathcal{E}_s = -L\frac{dI}{dt}.$$

По второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма падений напряжений в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, т.е.

$$IR = -L\frac{dI}{dt}, \text{ или } \frac{dI}{dt} + \frac{R}{L}I = 0,$$

$$\text{откуда } \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L}dt \text{ и } \ln I = -\frac{R}{L}t + \ln C.$$

Потенцируем: $I = C \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$. Константу находим из начальных условий:

при $t = 0$: $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$, следовательно, $C = I_0$. Тогда зависимость тока от времени при размыкании цепи имеет вид

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (6)$$

Замыкание цепи. Переключатель Π ставим в положение I. Кроме ЭДС самоиндукции в цепи есть ЭДС источника \mathcal{E} . В этом случае второй закон Кирхгофа

$$IR = \mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}.$$

Разделим переменные: $\frac{dI}{\mathcal{E} - IR} = \frac{1}{L} dt$.

Умножим обе части уравнения на $(-R)$:

$$-\frac{RdI}{\mathcal{E} - IR} = -\frac{R}{L} dt,$$

или

$$\frac{d(\mathcal{E} - IR)}{\mathcal{E} - IR} = -\frac{R}{L} dt.$$

После интегрирования получаем

$$\ln(\mathcal{E} - IR) = -\frac{R}{L} t + \ln C \Rightarrow \mathcal{E} - IR = Ce^{-\frac{R}{L} t}.$$

Обозначив $\frac{\mathcal{E}}{R} = I_0$, где I_0 – установившийся ток, получаем зависимость тока от времени при замыкании цепи

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right). \quad (7)$$

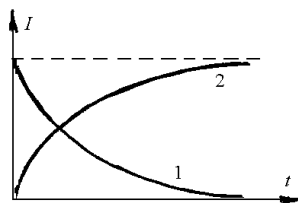


Рисунок 2

Величину $\tau = \frac{L}{R}$ называют временем релаксации – это время, в течение которого сила тока при размыкании цепи уменьшается в e раз. Экспоненциальные законы изменения тока при размыкании 1 и замыкании 2 цепи показаны на рис. 2.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Источник питания ИЭПП-2.
2. Катушка индуктивности.
3. Ферромагнитный сердечник.
4. Лабораторный стенд.
5. Осциллограф С1-83.

5. ХОД РАБОТЫ

1. Подключите источник питания и лабораторный стенд к сети 220 В. (Электрическая схема лабораторного стенда приведена на рис. 3).

2. Включите осциллограф тумблером "осциллограф", расположенным на панели лабораторного стенда и дайте ему прогреться в течение одной минуты.

3. Включите источник питания тумблером "Сеть" и установите с помощью потенциометра на передней панели источника напряжение 4 В.

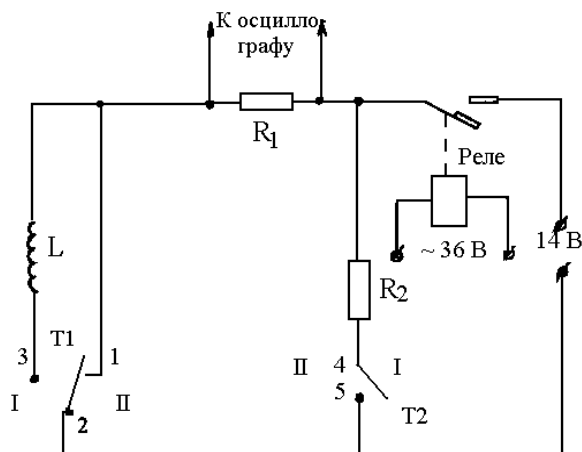


Рисунок 3

Упражнение 1

Наблюдение импульсного сигнала при замыкании и размыкании цепи

Цепь состоит из последовательно соединенных источника ЭДС, сопротивления R_1 и контактов реле (рис. 4). С сопротивления R_1 напряжение, пропорциональное току I ($U_{R_1} = IR_1$) подается на вертикальноотклоняющие пластины осциллографа.

4. Установите на лабораторном стенде тумблер 1 в положение II и тумблер 2 в положение I.²

5. Наблюдающуюся на экране осциллографа устойчивую картину прямоугольного импульса перенесите на миллиметровую бумагу.

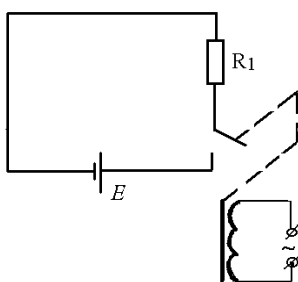


Рисунок 4

² У тумблера Т1 в положении I контакты 2-3 замкнуты, контакты 1-2 разомкнуты; в положении II контакты 3-2 разомкнуты, контакты 1-2 замкнуты. У тумблера Т2 в положении I контакты 4-5 разомкнуты, в положении II - замкнуты.

Упражнение 2

Наблюдение экстратоков замыкания и определение индуктивности катушки

6. Установите тумблер 1 в положение II, тумблер 2 в положение I. При этом в электрическую цепь будет дополнительно включена катушка индуктивности (рис. 5).

7. На экране осциллографа будет наблюдаться картина нарастания напряжения на сопротивлении R_1 (пропорционального экстратоку замыкания) в зависимости от времени. Пользуясь специальной шкалой, замерьте напряжения, соответствующие 0, 1, ..., 6 большим делениям оси времени. Цена большого деления по горизонтальной оси: $2 \cdot 10^{-3}$ с/дел., а по вертикальной 0,2 В/дел.

Экспериментальные данные занесите в табл. 1.

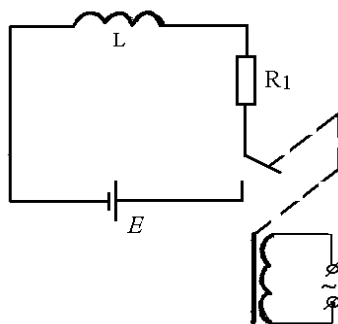


Рисунок 5

Т а б л и ц а 1

Время	Деле- ний	0	1	2	3	4	5	6
	с							
Катушка без сердечника	$U, \text{В}$							
	$\ln \frac{U_0 - U}{U_0}$							
Катушка с сердечником	$U, \text{В}$							
	$\ln \frac{U_0 - U}{U_0}$							

8. Рассчитайте для всех значений времени $y = \ln \frac{U_0 - U}{U_0}$, где U_0 - максимальное значение напряжения, соответствующее установившемуся току I_0 .

9. По данным табл. 1 постройте график, откладывая по вертикальной оси $y = \ln \frac{U_0 - U}{U_0}$, по горизонтальной оси - время t . График должен представлять собой прямую линию $y = -\frac{R}{L}t$, где $R = R_1 + R_k$, $R_1 = 2 \cdot 10^3$ Ом, $R_k = 2200$ Ом (активное сопротивление катушки).

Прямую по точкам проводите, применяя "метод наименьших квадратов". Он основан на вытекающем из теории ошибок положении, что наилучшая линия должна располагаться на плоскости XOY так, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от нее была минимальна.

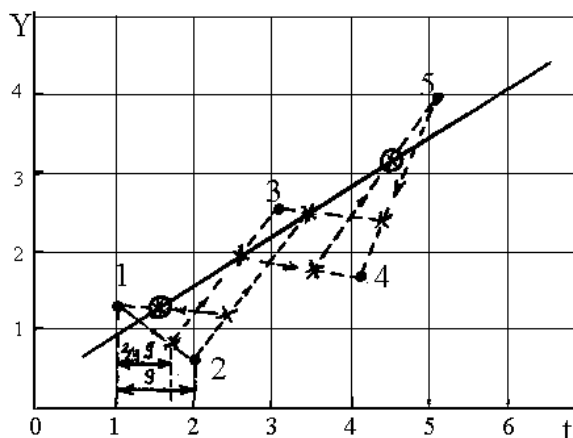


Рисунок 6

Построение выполняйте следующим образом: соедините точки 1 и 2 отрезком прямой и, двигаясь от точки 1 к точке 2, отметьте $2/3$ расстояния между ними. Соедините полученную точку с точкой 3 и снова отметьте $2/3S$. Повторяйте процедуру до тех пор, пока не будет получена последняя точка, которая и лежит на наилучшей прямой. Затем начните построение с другого конца (двигаясь от последней экспериментальной точки к предпоследней и т.д.) и получите вторую точку, лежащую на наилучшей прямой. Соедините прямой линией эти точки. На рис. 6 показано построение такой прямой по пяти точкам.

10. По тангенсу угла наклона прямой к оси времени $tg\alpha = \frac{y}{t} = -\frac{R}{L}$ и известному R оцените индуктивность катушки $L = -\frac{R}{y} t$.

11. Вставьте в катушку ферромагнитный сердечник и повторите действия в пунктах 7, 8, 9, 10.

12. Зная индуктивность катушки без сердечника и с сердечником, определите магнитную проницаемость ферромагнетика и сравните полученный результат с табличным значением.

Упражнение 3

Наблюдение экстратоков размыкания

13. Установите тумблер I в положение II, тумблер 2 в положение II. При этом по сравнению с упражнением 2 включается в электрическую цепь еще сопротивление R_2 (рис. 7).

14. На экране осциллографа наблюдается картина, состоящая из двух частей, соответствующих экстратокам замыкания и размыкания. Перенесите ее на миллиметровую бумагу. Вставьте в катушку сердечник и снова зарисуйте

осциллограмму.

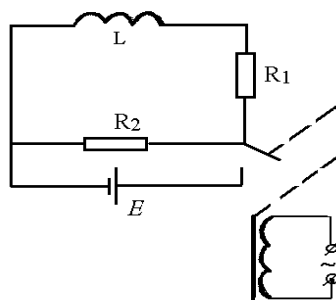


Рисунок 7

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение 4

15. Пользуясь осциллограммой экстратока размыкания, повторите действия, указанные в пунктах 7, 8, 9, 10, 11, 12 упражнения 2, учитывая, что $R = R_1 + R_k + R_2$, где $R_2 = 250$ Ом и $y = \ln \frac{U}{U_0}$. Сравните с результатами, полученными в упражнении 2.

Упражнение 5

16. Используя осциллограмму тока размыкания, определите индуктивность катушки с сердечником и без сердечника по времени релаксации $\tau = \frac{L}{R}$, зная, что это время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз. (т.е. $\frac{I_0}{I} = \frac{U_0}{U} \approx 2,72$). Для измерений U_0 и U примените ту же специальную шкалу, что в упражнении 2.

17. Сделайте выводы по работе и выпишите полученные значения индуктивности катушки без сердечника и с сердечником.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются явления электромагнитной индукции, самоиндукции, взаимной индукции?
2. Сформулируйте правило Ленца.
3. От чего зависит ЭДС самоиндукции?
4. От чего зависит индуктивность контура, и в каких единицах она измеряется?
5. Выведите формулы зависимостей от времени токов размыкания и замыкания цепи.
6. Что называется временем релаксации?
7. Как построить наилучшую прямую, пользуясь графическим методом наименьших квадратов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ СПОСОБОМ АМПЕРМЕТРА-ВОЛЬТМЕТРА И ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение методики определения сопротивления проводников способом амперметра и вольтметра используя технический метод с точным определением тока или напряжения.
2. Изучение методики определения сопротивления проводников при помощи моста постоянного тока.
3. Определение удельного сопротивления проводников.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1. Методика измерения сопротивления на приборе FPM-01

Измерение удельного сопротивления с помощью амперметра и вольтметра в приборе FPM-01 осуществляется на основе точного измерения тока или напряжения.

1. Рассмотрим схему и методику измерения активного сопротивления по техническому методу с точным измерением тока (рис. 1).

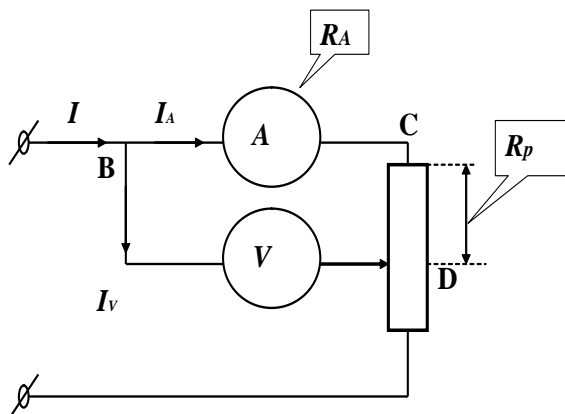


Рисунок 1

Если R_A - сопротивление амперметра, R_p - сопротивление участка резистора CD, то сопротивление R участка BD может быть определено по формуле

$$R = R_A + R_p.$$

Отсюда сопротивление R_p участка CD резистора определится из выражения

$$R_p = R - R_A. \quad (1)$$

Так как в данной схеме амперметр показывает точное значение тока, проходящего через резистор, а вольтметр определяет напряжение на участке BD, то для данного участка ток определится из закона Ома

$$I_A = \frac{U_V}{R}.$$

Отсюда сопротивление R равно

$$R = \frac{U_V}{I_A}. \quad (2)$$

Подставляя значение сопротивления R из уравнения (2) в выражение (1), получим рабочую формулу для определения сопротивления участка резистора CD:

$$R_P = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (3)$$

Удельное сопротивление однородного участка проводника может быть определено из выражения

$$R_P = \rho \frac{l}{S}. \quad (4)$$

Рассмотрим схему и методику измерения активного сопротивления по техническому методу с точным измерением напряжения (рис. 2).

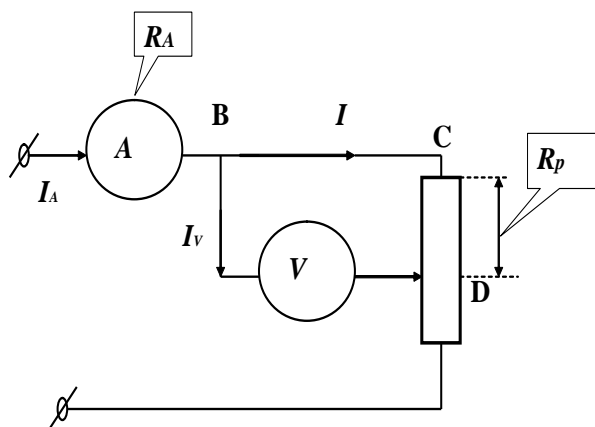


Рисунок 2

Если R_V - сопротивление вольтметра, R_P - сопротивление участка резистора CD, то сопротивление R участка BD может быть определено по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_P}.$$

Отсюда сопротивление R_P участка резистора CD определится из выражения

$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_V}. \quad (5)$$

Так как в данной схеме вольтметр показывает точное значение напряжения на участке BD (сопротивлением подводящих проводов на участке BC и

других участках пренебрегаем), а амперметр определяет ток на этом участке, то для данного участка ток определится из закона Ома

$$I_A = \frac{U_V}{R}.$$

Отсюда сопротивление R равно

$$R = \frac{U_V}{I_A}. \quad (6)$$

Подставляя значение сопротивления R из уравнения (6) в выражение (5), получим рабочую формулу для определения сопротивления участка резистора CD:

$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{\frac{U_V}{I_A}} - \frac{1}{R_V}.$$

Отсюда можно определить сопротивление R_P участка резистора CD:

$$R_P = \frac{1}{\frac{I_A}{U_V} - \frac{1}{R_V}} \approx \frac{I_A}{U_V} + \frac{1}{R_V}. \quad (7)$$

Удельное сопротивление однородного участка проводника, как и в предыдущем случае, может быть определено из выражения (4).

3.2. Описание прибора FPM-01

Общий вид прибора FPM-01 представлен на рис. 3. Основание 1 оснащено регулировочными винтами, которые позволяют произвести выравнивание положение прибора. К основанию прикреплен колонна 2 с нанесенной метрической шкалой 3. На колонне монтированы два неподвижных кронштейна 4 и один подвижный кронштейн 5, который может передвигаться вдоль колонны и фиксироваться в любом положении. Между верхним и нижним кронштейнами натянут резистивный провод 6, который прикреплен к кубикам 7 с помощью винтов. На подвижном кронштейне нанесена черта, которая облегчает определение длины отрезка измеряемого резистивного проводника. Нижний, верхний и центральный контакты резистивного проводника подведены при помощи проводников низкого сопротивления к измерительной части прибора.

3.3. Функциональное назначение манипуляционных элементов прибора FPM-01

Клавиша W1 - (сеть) - включение прибора в сеть переменного напряжения 220В. Нажатие клавиши в сеть вызывает включение напряжения питания. Визуально при включении загорается неоновая лампочка.

Клавиша W3 - (мостик) - переключатель вида работ. При отжатии клавиши прибор обеспечивает работу с мостиком постоянного тока.

При нажатии клавиши прибор позволяет произвести измерение активного сопротивления проводника по техническому методу.

Клавиша W2 - переключатель режимов технического метода измерения сопротивления: при отжании клавиши - точное измерение тока, при нажатии клавиши - точное измерение напряжения.

Рукоятка P1 - регулировка тока - потенциометр регулировки тока.

Z11, Z12, Z13 - лабораторные зажимы для подключения моста постоянного тока.

Z17 - зажим для подключения заземления.

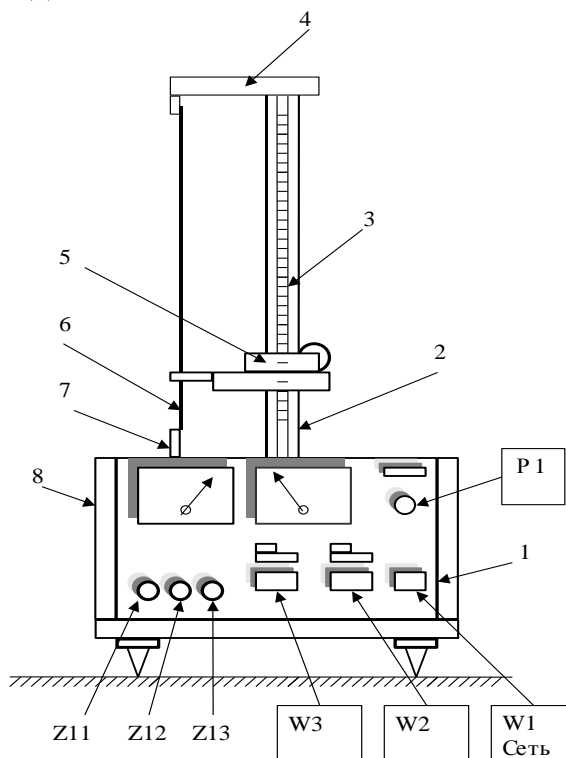


Рисунок 3

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ МЕТОДУ

4.1. Точное измерение тока

Нажмите клавишу W3 переключателя вида работ. (В нажатом положении клавиши W3 измерение сопротивления производится по техническому методу).

Отожмите клавишу W2 переключателя режимов технического метода измерения сопротивления. (В отжатом положении измерение производится при точном определении тока, рис. 1).

Включите прибор в сеть переменного напряжения 220 В тумблером W1 (сеть).

Установите при помощи потенциометра регулировки тока P1 такое значение тока, чтобы вольтметр показывал примерно $\frac{2}{3}$ измерительного диапазона.

Запишите показания амперметра и вольтметра в табл. 1.

Определите при помощи микрометра диаметр исследуемого провода в пяти точках. Рассчитайте средний диаметр провода. Результаты расчета занесите в табл. 1.

Найдите длину исследуемого провода по шкале на колонне. Результаты измерения длины занесите в табл. 1.

Запишите в таблицу величины внутреннего сопротивления амперметра и вольтметра.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	I, A	U, B	$d, м$	$l, м$	$R, Ом$	$\rho, Ом \cdot м$
1						
2						
...						

Внутреннее сопротивление миллиамперметра - Ом.

Внутреннее сопротивление вольтметра - Ом.

Рассчитайте по формулам (3) и (4) сопротивление и удельное сопротивление измеряемого провода. Результаты расчета запишите в табл. 1.

Измените длину исследуемого проводника на 2-3 см и повторите измерения и расчеты. Результаты измерений запишите в табл. 1.

Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности сопротивления и удельного сопротивления исследуемого проводника методом средних значений и вероятностным методом при заданной надежности (по указанию преподавателя).

Окончательный результат запишите в виде:

$$(< R > \pm < \Delta R >) Ом, \varepsilon_R, \% ; (< \rho > \pm < \Delta \rho >) Ом \cdot м, \varepsilon_\rho, \%$$

4.2. Точное измерение напряжения

Нажмите клавишу W3 переключателя вида работ. (В нажатом положении клавиши W3 измерение сопротивления производится по техническому методу).

Нажмите клавишу W2 переключателя режимов технического метода измерения сопротивления. (В нажатом положении измерение производится при точном определении напряжения, рис. 2).

Включите прибор в сеть переменного напряжения 220 В тумблером W1 (сеть).

Установите при помощи потенциометра регулировки тока P1 такое значение тока, чтобы вольтметр показывал примерно 2/3 измерительного диапазона.

Запишите показания амперметра и вольтметра в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

№ п/п	I, A	U, B	$d, м$	$L, м$	$R, Ом$	$\rho, Ом \cdot м$
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
3						
4						
5						

Внутреннее сопротивление миллиамперметра - Ом.

Внутреннее сопротивление вольтметра - Ом.

Определите диаметр и длину исследуемого провода при помощи микрометра и шкалы на колонне. Результаты измерения длины запишите в табл. 2.

Запишите в таблицу величины внутреннего сопротивления амперметра и вольтметра.

Рассчитайте по формулам (3) и (4) сопротивление и удельное сопротивление измеряемого провода. Результаты расчета запишите в табл. 2.

Измените длину исследуемого проводника на 2-3 см и повторите измерения и расчеты. Результаты измерений запишите в табл. 2.

Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности сопротивления и удельного сопротивления исследуемого проводника методом средних значений и вероятностным методом при заданной надежности (по указанию преподавателя).

Окончательный результат запишите в виде:

$$(< R > \pm < \Delta R >) Ом, \varepsilon_R, \%.; (< \rho > \pm < \Delta \rho >) Ом, \varepsilon_\rho, \%.$$

4.3. Измерение сопротивления при помощи моста постоянного тока

Отожмите клавишу W3 переключателя вида работ. (В отжатом положении клавиши W3 измерение сопротивления производится при помощи моста постоянного тока).

Подключите мост постоянного тока к зажимам Z11, Z12.

Передвиньте подвижный кронштейн на расстояние, примерно равное 0,7 длины провода по отношению к основанию.

Включите мост постоянного тока (порядок включения и работа с мостом постоянного тока приведены в отдельной инструкции). Измерьте сопротивление исследуемого проводника. Результаты измерения запишите в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

№ п/п	$d, м$	$l, м$	$R, Ом$	$\rho, Ом \cdot м$
1	2	3	4	5
1				
2				
...				

Определите диаметр и длину исследуемого провода при помощи микрометра и шкалы на колонне. Результаты измерения длины запишите в табл. 3.

Рассчитайте по формуле (4) удельное сопротивление измеряемого провода. Результаты расчета запишите в табл. 3.

Измените длину исследуемого проводника на 2-3 см и повторите измерения и расчеты. Результаты измерений запишите в табл. 3.

Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности сопротивления и удельного сопротивления исследуемого проводника методом средних значений и вероятностным методом при заданной надежности (по указанию преподавателя).

Окончательный результат запишите в виде:

$$(< R > \pm < \Delta R >) \text{ Ом}, \varepsilon_R, \% ; (< \rho > \pm < \Delta \rho >) \text{ Ом}, \varepsilon_\rho, \%$$

Сделайте краткие выводы по работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите закон Ома и Джоуля - Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Поясните смысл величин, входящих в эти законы.

2. Объясните методику измерения сопротивления проводников по техническому методу.

3. Объясните методику измерения сопротивления проводников мостовым методом. Выведите соотношение для определения сопротивления с помощью моста постоянного тока.

4. Поясните температурную зависимость сопротивления металлов, полупроводников и электролитов.

5. Объясните смысл явления сверхпроводимости. Поясните сущность высокотемпературной сверхпроводимости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ТОМСОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение отношения заряда электрона к его массе на основе взаимной компенсации отклонений, вызываемых взаимно перпендикулярными электрическими и магнитным полями.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов.- [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Идея метода определения удельного заряда электрона принадлежит известному английскому физiku Дж. Томсону. Он использовал этот метод в 1897 г., чтобы установить природу катодных и анодных лучей в трубках с разреженными газами. Эти опыты привели к открытию электрона и изотопов. Впервые был определен удельный заряд электронов.

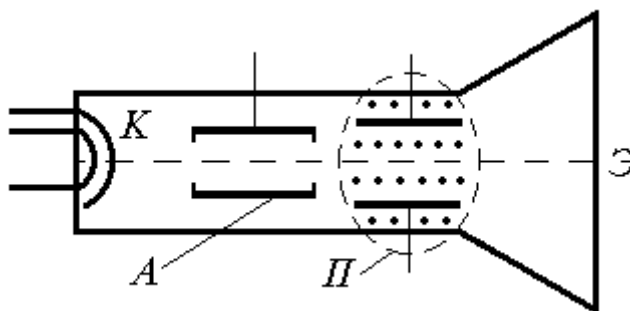


Рисунок 1

На рис. 1 схематически показан прибор для определения удельного заряда электрона методом Томсона. источником электронов служит подогреваемый катод K. испускаемые катодом электроны ускоряются и фокусируются анодом A, имеющим форму цилиндра. Сфокусированный пучок электронов попадает в пространство между пластинами П плоского конденсатора, а затем на флуоресцирующий экран Э, вызывая его свечение при соударении с электронами. Все элементы прибора помещены в стеклянный сосуд, в котором создано разрежение. Если на пластины конденсатора подать напряжение, то пучок электронов будет двигаться в практически однородном электрическом поле, которое будет отклонять электроны в вертикальном направлении.

Вследствие этого пучок электронов попадёт не в центр экрана, а сместится на некоторое расстояние y (рис. 2). Вычислим величину этого смещения.

Рассмотрим узкий пучок электронов, который вследствие электрического поля попадает на экран в точку O . Найдём отклонение следа на экране, вызываемого однородным электрическим полем, перпендикулярным к направлению движения электронов и действующим на пути длиной l .

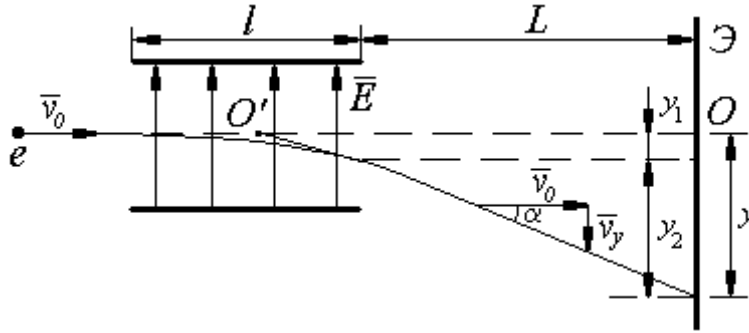


Рисунок 2

Обозначим первоначальную скорость электронов через V_0 . На электрон в электрическом поле действует сила $\vec{F} = e\vec{E}$, которая сообщает ему постоянное по величине и направлению ускорение $\vec{a}_y = e\vec{E}/m$. Под действием электрического поля электроны находятся в течение времени $t = l/V_0$. За это время они сместятся на расстояние

$$y_1 = \frac{a_y t^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \left(\frac{l}{v_0} \right)^2 E$$

и приобретут перпендикулярную к v_0 составляющую скорости \vec{v}_y , равную

$$v_y = \frac{e}{m} \frac{l}{v_0} E.$$

За пределами поля (вне конденсатора) электроны будут двигаться по инерции прямолинейно под некоторым углом α к направлению скорости v_0 . Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_0} = \frac{e}{m} \frac{l}{v_0^2} E. \quad (1)$$

Вследствие такого прямолинейного движения под углом α к оси прибора вылетевший из конденсатора и достигший экрана электрон дополнительно сместится на расстояние y_2 по вертикали. Если обозначить через L расстояние от экрана до ближайшего края конденсатора, то смещение y_2 можно вычислить по формуле

$$y_2 = L \operatorname{tg} \alpha = \frac{e}{m} \frac{Ll}{v_0^2} E.$$

Таким образом, полное смещение электронов в электрическом поле

$$y = y_1 + y_2 = \frac{e}{m} \frac{l}{v_0^2} \left(L + \frac{1}{2} l \right) E = \operatorname{tg} \alpha \left(L + \frac{1}{2} l \right). \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что электроны, покидая поле, движутся так, как если бы они вылетали из центра конденсатора O' под углом α (рис. 2), определяемым соотношением (1). Так как $E = U/d$, где d – расстояние между обкладками конденсатора, то для вычисления elm необходимо знать параметры прибора l, L, d , а также v_0, y, U . Величины U и y можно легко измерить, а для определения v_0 Томсон предложил следующий метод, суть которого состоит в том, что в области пространства прибора, где имеется электрическое поле, создается одновременно и магнитное поле (пунктирная область на рис. 2). Магнитное поле перпендикулярно к электрическому и начальной скорости электронов \vec{v}_0 . Этим обеспечивалось отклонение электронов в магнитном поле в той же плоскости, что и электрическом поле, т. е. в вертикальной плоскости. Направление магнитного поля выбирается таким, чтобы пучок в нем отклонялся в сторону, противоположную его отклонению в электрическом поле. Индукция магнитного поля B должна быть такой, чтобы вертикальная составляющая силы Лоренца, действующей на электроны в магнитном поле, равнялась электрической силе $e\vec{E} = e[\vec{v}_0 \times \vec{B}]$. При таком условии пучок электронов в приборе не будет испытывать отклонения, т. е. попадет в точку O на экране. Из условия равенства электрической и магнитной сил можно определить v_0 и выразить ее через экспериментально измеряемые величины. Действительно,

$$v_0 = \frac{E}{B} = \frac{U}{\mu\mu_0 H d}.$$

Если магнитное поле создается с помощью соленоида, то $H = nI$, и с учетом того, что $\mu = 1$, получаем

$$v_0 = \frac{U}{\mu_0 n I d},$$

где I – сила тока в соленоиде, n – число витков соленоида на единицу его длины. В правой части полученного выражения стоят величины, которые можно измерить на опыте, и, следовательно, определить v_0 .

Подставив полученное выражение для v_0 в формулу (2), найдем удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{v_0^2 y}{l(L + \frac{1}{2}l)E} = \frac{(\frac{U}{\mu_0 n I d})^2 y}{l(L + \frac{1}{2}l)\frac{U}{d}} = k \frac{U}{n} \mu_0, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{1}{\mu_0^2 n^2 l(L + \frac{1}{2}l)d}. \quad (4)$$

– некоторая величина, зависящая от параметров прибора и являющаяся постоянной для данного прибора. Измеряя на опыте U, l, y и зная постоянную прибора k , можно по формуле (3) вычислить удельный заряд электрона.

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для измерения удельного заряда электронов методом Томсона собрана на базе серийного осциллографа ЛО-70 с электростатическим управлением лучом. Электрическое поле создается в области между вертикально отклоняющими пластинами Π электроннолучевой трубки (рис. 3). Постоянное напряжение U на пластины подается от внутреннего источника осциллографа а его величина регулируется потенциометром R и измеряется выносным вольтметром V .

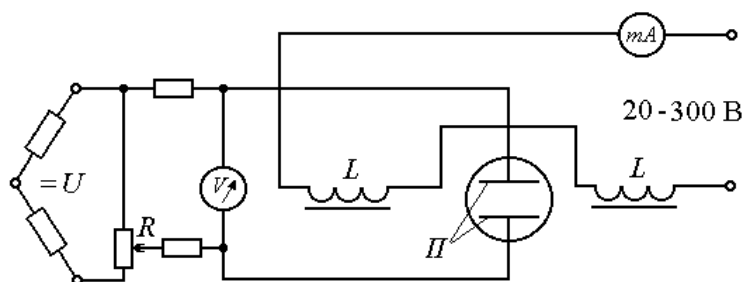


Рисунок 3

Магнитное поле, силовые линии которого идут горизонтально, создается в той же области пространства, что и электрическое поле с помощью двух катушек индуктивности смонтированных снаружи электронно-лучевой трубки. Катушки L питаются от выхода УИПа «20 - 300 В». Сила тока, проходящего через катушки, регулируется потенциометром выхода «20 - 300 В» УИПа и измеряется миллиамперметром, смонтированным на его передней панели. В соответствии с требованиями метода магнитное поле является практически однородным в области между пластинами Π и быстро убывает вне области электрического поля.

Параметры установки $l = 10$ мм, $L = 45$ мм, $d = 5$ мм, $a = 4 \cdot 10^3$ м⁻¹. Размер ячейки сетки экрана осциллографа 6×6 мм.

5. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Осциллограф типа ЛО-70.
2. Катушка индуктивности.
3. Блок питания УИП-2.
4. Вольтметр.
5. Переменный резистор.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить ручки потенциометра R и регулятора выхода «20...300 В» УИПа в крайнее левое положение.

2. Включить осциллограф и блок питания УИП-2 в сеть и дать им прогреться в течение 10 мин. Произвести предварительную регулировку осциллографа. Выключить генератор развертки осциллографа и установить след луча в центре экрана.

3. Вращая ручку потенциометра R , подать на пластины II напряжение U такой величины, чтобы светящаяся точка на экране осциллографа сместилась от центра на расстояние 5...20 мм. Величину смещения y и соответствующего ему напряжения U записать в таблицу.

4. Вращением ручки регулятора выхода «20 - 300 В» УИПа установить такой ток I в катушках L , чтобы светящаяся точка на экране вернулась в своё первоначальное положение в центре экрана. Записать в таблицу силу тока I , измеряемого прибором УИПа.

5. Повторить измерения, описанные в пп. 3 и 4, 5 - 8 раз, меняя величину смещения следа электронного луча на экране y .

7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать величину постоянного множителя k по формуле (4).
2. Пользуясь данными таблицы, определить удельный заряд электронов по формуле (3) для каждого из опытов.
3. Найти среднее значение удельного заряда электрона по данным всех опытов и определить абсолютную и относительную погрешности полученного результата по сравнению с табличным значением e/m .
4. Определить среднюю скорость электронов по данным одного из опытов по формуле
$$v_0 = \frac{E}{B} = \frac{U}{\mu_0 n I d}.$$

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По какой траектории будет двигаться заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле перпендикулярно к линиям индукции поля?
2. Каков характер движения заряженной частицы в однородном магнитном поле?
3. Как выводится уравнение кривой, по которой будет происходить движение заряженной частицы в однородном электрическом поле (начальная скорость частицы перпендикулярна к силовым линиям поля)?
4. Как вычислить для предыдущего случая величину смещения частицы?
5. В чем суть метода Томсона по определению удельного заряда частицы?
6. Как устроен прибор для измерения удельного заряда электронов методом Томсона?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУМЕРНОЙ РЕШЕТКИ МИКРОСКОПИЧЕСКИМ И ДИФРАКЦИОННЫМ МЕТОДАМИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение параметров двумерной решетки (сетки) микроскопическим и дифракционным методами, анализ и сопоставление полученных результатов.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Под дифракционной решеткой в широком смысле слова понимают всякую структуру, обладающую пространственной периодичностью. Если свойства структуры периодически меняются только в одном направлении, то решетка называется одномерной или линейной. Если же периодичность решетки имеет место в двух или трех направлениях, то решетка называется соответственно двух- или трехмерной (пространственной).

Теория линейной дифракционной решетки дает следующее выражение для интенсивности света, распространяющегося под углом φ к нормали после дифракции на правильной структуре из N щелей

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

где b - ширина щели, d - период решетки, λ - длина волны. Множитель I_0 определяет интенсивность света, излучаемого в направлении $\varphi=0$, которая зависит от потока энергии падающего на решетку света. Первый множитель характеризует распределение интенсивности в результате дифракции плоской волны на каждой щели. Он обращается в нуль в точках, для которых

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

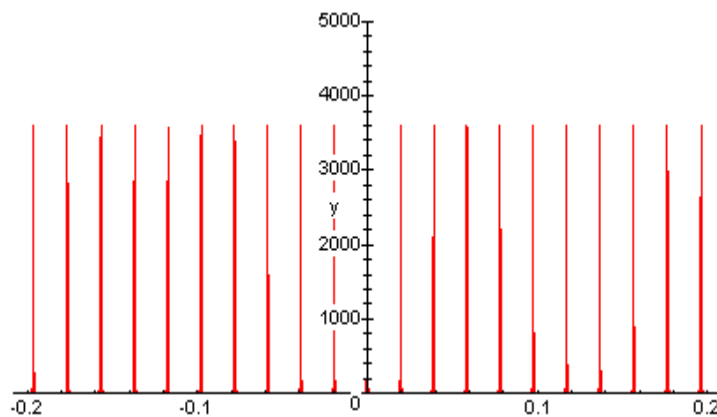
В этих точках интенсивность, создаваемая каждой из щелей в отдельности, равна нулю.

Второй множитель, учитывающий интерференцию между пучками, исходящими от всех щелей, принимает значение N^2 в точках, удовлетворяющих условию

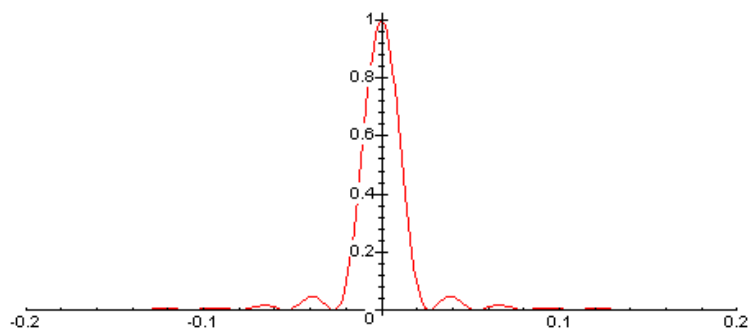
$$d \sin \varphi = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (3)$$

На рис. 1 показано распределение интенсивности I_φ/I_0 при дифракции света на правильной структуре из N щелей:

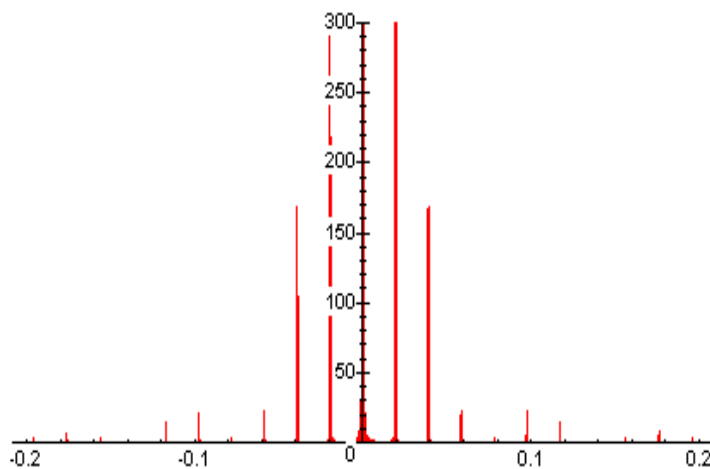
- а) интерференционная картина N пучков от разных щелей;
- б) интерференционная картина от каждой щели;
- в) суммарное распределение интенсивности для дифракционной решетки для $N = 60$ и $\frac{d}{b} = \frac{5}{4}$.



а)



б)



в)

Рисунок 1

Из формул (1), (2), и (3) следует, что интенсивность m -го главного максимума

$$I_m = \frac{\sin^2(\pi m b/d)}{b^2 n^2 m^2} \cdot d^2 N^2 I_0. \quad (4)$$

Из анализа формулы (4) следует, что $I_m \sim \frac{1}{m^2}$, т.е. с увеличением порядка дифракции достаточно быстро уменьшается интенсивность соответствующего главного максимума. Следует отметить, что этот вывод справедлив только для решетки, состоящей из периодически чередующихся прозрачных щелей и непрозрачных мест, т.е. коэффициент пропускания решетки меняется вдоль нее периодическими скачками от 0 до 1. Так, при дифракции на решетке, прозрачность которой меняется по синусоидальному закону, наблюдаются максимумы только первого порядка. Кроме того, интенсивность света в m -м максимуме существенно зависит от отношения d/b . Действительно, из формул (2) и (3) вытекает, что главный максимум m -го порядка придется на k -й минимум от одной щели, если будет выполнено равенство $d/b = mk$. Это возможно, если d/b равно отношению двух целых чисел r и s . Тогда главный максимум r -го порядка наложится на s -й минимум от одной щели, максимум $2r$ -ого порядка на $2s$ -й минимум и т.д., в результате чего максимумы порядков r , $2r$, $3r$ будут отсутствовать.

Описанные выше особенности дифракционной картины относятся к случаю одномерной решетки, коэффициент пропускания которой меняется только вдоль одного направления. Рассмотрим двумерную решетку, представляющую собой скрещенные перпендикулярные решетки с периодами d_1 и d_2 . Узкий пучок монохроматического света, пройдя через первую решетку с вертикальными, например, штрихами дает совокупность максимумов вдоль горизонтальной линии. Световой пучок, соответствующий каждому максимуму, проходя через вторую решетку, распадается на новую совокупность пучков, дающих максимумы вдоль вертикальной линии. Полная картина спектра подобна изображению на рис. 2. Цифры показывают порядок спектра в первой и второй решетках; интенсивность их убывает по закону распределения интенсивности в дифракционных спектрах решетки.

Если решетки с d_1 и d_2 не взаимно перпендикулярны, то положения рефлексов (максимумов) будут зависеть и от угла между штрихами решеток. Таким образом, по расположению рефлексов можно судить о структуре поверхности: о величине периодов d_1 и d_2 и взаимной ориентации решеток.

Если поверхностная структура не периодична, картина получится более сложной. В частности, если структура состоит из частиц, близких по форме и размерам, но всевозможно ориентированных, например запыленная пластинка, то такая структура эквивалентна совокупности простых решеток всех возможных ориентировок, а соответствующая дифракционная картина пред-

ставится в виде концентрических колец. Этот случай исследуется в лабораторной работе 30 (упражнение 5.2).

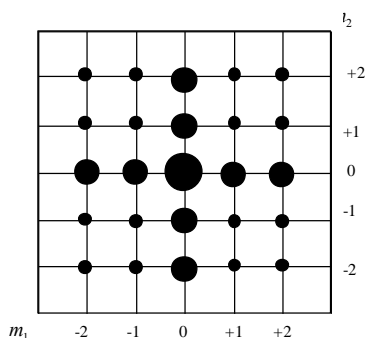


Рисунок 2

На рис. 2 схематическое изображение распределения интенсивности при дифракции света на двумерной решетке (сетке).

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Двумерная дифракционная решетка (сетка).
2. Микроскоп.
3. Оптическая скамья.
4. Полупроводниковый лазер.
5. Экран.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Определение параметров (периода и ширины щели) двумерной решетки (сетки) микроскопическим методом

Применяемый в данной работе микроскоп снабжен окулярным микрометром, т.е. стеклянной пластинкой со шкалой, расположенной в фокальной плоскости окуляра.

Для того чтобы определить размер предмета надо проградуировать шкалу окулярного микрометра в делениях другого масштаба, располагаемого на месте исследуемого предмета. Таким масштабом является объект – микрометр, т.е. объектная шкала, цена деления которой известна (0,01 мм). Чтобы получить четкое изображение объектной шкалы тубус микроскопа сначала перемещают вниз винтом грубой наводки почти до упора в объект. За расстоянием между предметом и объективом удобно следить, глядя сбоку в плоскости рассматриваемого объекта. Обращаем особое внимание студентов на то, что при отсутствии контроля сбоку тубус микроскопа можно перемещать только вверх! При движении вниз нетрудно проскочить правильное расстояние и объектив упрется в рассматриваемый объект, - объект или объектив при этом могут быть испорчены. Наблюдая в микроскоп, медленно поднимают тубус винтами грубой и точной наводки, пока не будет получено резкое изображение шкалы. Поворачивая и сдвигая объектную шкалу на предметном столике, устанавливают ее так, чтобы деления обеих шкал были

параллельны. Затем находят такие деления окулярной шкалы, которые совмещаются с двумя делениями объект – микрометра. Цену деления окулярной шкалы в мм определяют по формуле

$$S = \frac{0,01U}{V},$$

где U - число делений объект - микрометра, а V - число делений окулярной шкалы, находящихся на отрезке между совпадающими делениями шкал. Так, если на 5 делений шкалы объект – микрометра приходится 10 делений окулярной шкалы, то цена деления этой шкалы $S = 0,005$ мм.

Для определения параметров двумерной решетки следует укрепить ее на предметном столике микроскопа и добиться четкого ее изображения (рис. 3). Помните, что как и при работе с объект-микрометром, при отсутствии контроля сбоку тубус микроскопа можно перемещать только вверх. Совместите по длине, а затем по ширине изображение решетки со шкалой окуляра и отсчитайте количество делений шкалы, укладывающееся на нужном участке изображения. Полученное число делений шкалы умножьте на цену одного деления.

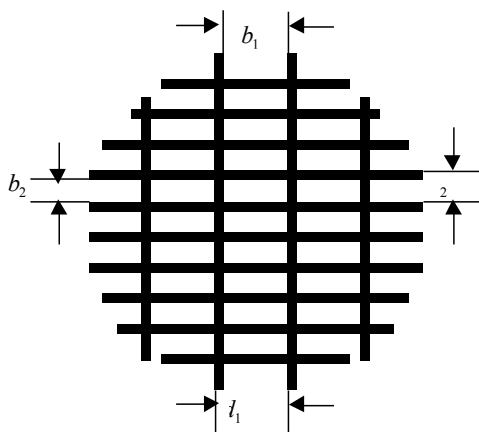


Рисунок 3

На рис. 3 изображена двумерная решетка в микроскопе

В случае решетки с квадратными ячейками $d_1 = d_2 = d$ и $b_1 = b_2 = b$. Измерения произвести шесть раз (в случае квадратной решетки 3 в вертикальном и 3 в горизонтальном направлениях) в разных местах решетки и результаты занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	d	$\langle d \rangle$	Δd	$\langle \Delta d \rangle$	b	$\langle b \rangle$	Δb	$\langle \Delta b \rangle$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

5.2. Теоретический расчет картины дифракции на двумерной решетке

Результаты микроскопического изучения двумерной решетки дают возможность предсказать характер дифракционной картины. Так, если решетка имеет квадратные ячейки, то дифракционная картина также должна обладать осью симметрии четвертого порядка и иметь вид, подобный изображенному на рис. 2.

Используя пакет программ MAPL, по данным микроскопических измерений периода решетки (a) и ширины щели (b) постройте графики сомножителей в выражении (1) и полную функцию. В качестве аргумента можно использовать как угол дифракции, так и его синус. Такой график показывает не только положения главных максимумов, но и их относительную интенсивность.

5.3. Определение параметров двумерной решетки по дифракционной картине

Установка для проведения этого упражнения состоит из оптической скамьи, на которой размещаются лазер, дифракционная решетка и экран для наблюдения дифракционной картины.

Дифракционную решетку и экран для наблюдения устанавливают перпендикулярно к оси луча лазера. Для этого световой блик, отраженный от плоскости решетки, следует вывести точно на середину выходного окна лазера. Также перпендикулярно к лучу лазера устанавливают и экран для наблюдения интерференционной картины (рис. 4).

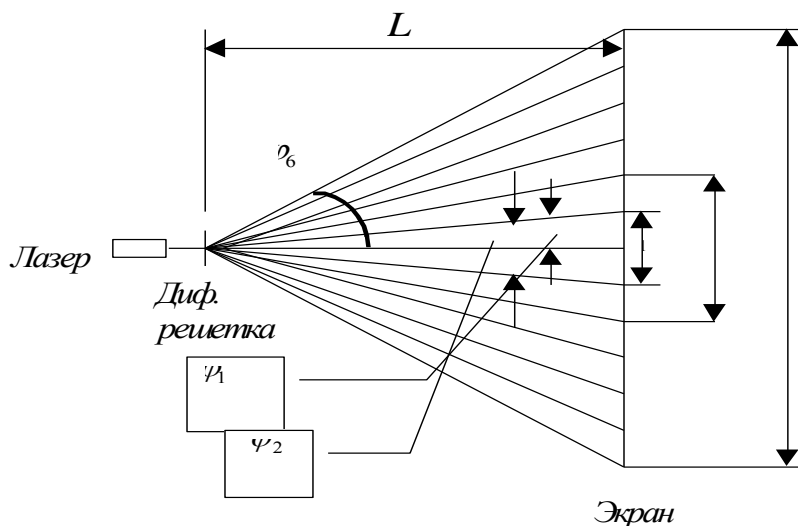


Рисунок 4

Расчет периода решетки проведите по формуле (3). Угол дифракции определите из соотношения

$$\sin \varphi_m = \frac{x_m}{2\sqrt{L^2 + \frac{x_m^2}{4}}} = \frac{x_m}{\sqrt{4L^2 + x_m^2}}, \quad (5)$$

где x_m - расстояние между центрами симметричных рефлексов (максимумов) одного порядка, L – расстояние от дифракционной решетки до экрана.

Порядок выполнения упражнения 3

1. Измерьте расстояние между полупроводниковым лазером и экраном. Запишите длину волны лазера $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-7}$ м. Результаты измерений запишите в табл. 2.

2. Определите расстояния между центрами симметричных главных дифракционных максимумов x_m для первого, второго и т.д. порядков спектра. Результаты измерений запишите в табл. 2.

3. Оцените относительные интенсивности дифракционных рефлексов (максимумов по пятибальной шкале: о.с. – очень сильная; с. – сильная; ср. – средняя; сл. – слабая; о.сл. – очень слабая. Результаты измерений запишите в табл. 2.

4. Рассчитайте по формуле (4) период дифракционной решетки d , среднее значение периода $\langle d \rangle$, среднюю абсолютную $\langle \Delta d \rangle$ и среднюю относительную ε погрешности методом средних значений. Результаты измерений запишите в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Порядок максимума	Интенсивность	$x_m, \text{м}$	$\sin \varphi$	φ	$d, \text{м}$	$\langle d \rangle, \text{м}$	$\Delta d, \text{м}$	$\langle \Delta d \rangle, \text{м}$	ε
1									
2									
3									

Погрешность измерения периода дифракционной решетки основано на анализе соотношения (3). Действительно, из выражения (3) следует, что погрешность определения периода решетки можно рассчитать по формуле

$$\Delta d = d \operatorname{ctg} \Delta \varphi. \quad (6)$$

Как видно, эта погрешность уменьшается при увеличении угла дифракции. Поэтому, для более точного определения d следует использовать последние 3 - 5 рефлексов из наблюдаемых на экране.

Результаты расчетов представить в виде $d = \langle d \rangle \pm \langle \Delta d \rangle$.

Убедитесь, что период решетки, определенный по дифракционной картине, в пределах погрешности эксперимента совпадает с таковым, определенным микроскопическим методом. Убедиться также, что наибольшее ослабление интенсивности рефлексов имеет место в том случае, когда положения максимумов при дифракции на решетке близки или совпадают с положениями минимумов при дифракции на щели этой решетки.

5. Сделайте краткие выводы по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой критерий определяет отличия между дифракциями Френеля и Фраунгофера?
2. Получите условия минимумов и максимумов при дифракции Фраунгофера на щели.
3. Получите условия главных максимумов при дифракции Фраунгофера на решетке.
4. Объясните закономерности изменения интенсивности главных максимумов при дифракции на решетке.
5. Какие максимумы исчезают при дифракции на решетке, период которой в 3 раза больше ширины щели?
6. Как определить N – число щелей, участвующих в создании дифракционной картины решетки?
7. Опишите процедуру перемещения тубуса микроскопа для получения четкого изображения объекта.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 16

ГРАДУИРОВКА ЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ФИГУР ЛИССАЖУ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определение частоты неизвестного синусоидального колебания с помощью фигур Лиссажу.
2. Градуировка звукового генератора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.1: Механика. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1989. - 350 с.
2. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.И. Практикум по физике. - М.: Высш. шк., 1965. - 568 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Для определения частоты неизвестного гармонического колебания часто используется метод фигур Лиссажу, который заключается в следующем. Неизвестное исследуемое синусоидальное колебание складывают с взаимно перпендикулярным ему синусоидальным колебанием известной частоты, в результате чего получаются кривые сложной формы, называемые фигурами Лиссажу, по общему виду которых можно определить частоту неизвестного колебания и в некоторых случаях разность фаз.

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных колебания X и Y с частотами $\omega_x = \omega$ и $\omega_y = n \cdot \omega$. Тогда

$$n = \frac{\omega_y}{\omega_x}, \quad \text{и} \quad \begin{cases} x = x_0 \cos \omega t \\ y = y_0 \cos(n\omega t + \varphi_0) \end{cases}, \quad (1)$$

где x_0, y_0 - амплитудные значения X и Y ; φ_0 - начальная разность фаз между колебаниями; n - номер гармоники.

Система уравнений (1) представляет собой уравнение плоской кривой, являющейся результатом сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний, заданной в параметрической форме.

Определим уравнение этой кривой в явном виде, исключая из системы уравнений (1) время. Несложные математические преобразования приводят к уравнению вида (2).

Разлагая правую часть уравнения (2) по биному Ньютона и приравнивая действительные части слева и справа, получаем уравнение кривой в явном виде, являющейся траекторией колеблющейся точки. Эта кривая называется фигурой Лиссажу.

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n \left(\omega t + \frac{\varphi_0}{n} \right) = \left[\begin{pmatrix} \frac{x}{x_0} \cos \frac{\varphi_0}{n} - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{n} \\ + i \cdot \left(\sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \cos \frac{\varphi_0}{n} + \frac{x}{x_0} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{n} \end{pmatrix} \right]^n \quad (2)$$

Пример. Рассмотрим сложение колебаний с одинаковыми частотами ($n = 1$). Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{y}{y_0} = \frac{x}{x_0} \cos \varphi_0 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \sin \varphi_0, \quad (3)$$

откуда

$$\left(\frac{x}{x_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 - 2 \cdot \frac{x}{x_0} \cdot \frac{y}{y_0} \cdot \cos \varphi_0 = \sin^2 \varphi_0. \quad (4)$$

Уравнение (4) является уравнением эллипса. Рассмотрим частные случаи этого уравнения.

1. Колебания X и Y происходят в одинаковых фазах, т.е. $\varphi_0 = 0$. Тогда уравнение (4) примет вид

$$\left(\frac{x}{x_0} - \frac{y}{y_0} \right)^2 = 0 \quad \text{или} \quad y = \frac{y_0}{x_0} \cdot x,$$

т.е. эллипс вырождается в прямую (рис. 1).

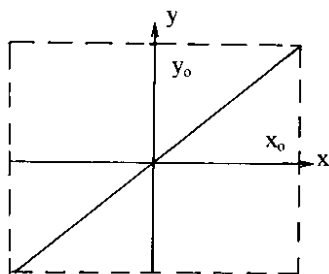


Рисунок 1

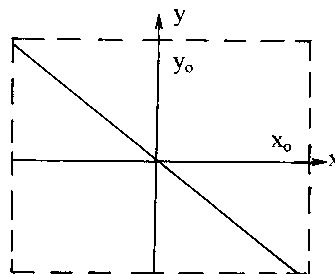


Рисунок 2

2. При разности фаз $\varphi_0 = \pi$ уравнение (4) станет уравнением прямой (рис. 2)

$$\left(\frac{x}{x_0} + \frac{y}{y_0} \right)^2 = 0 \quad \text{или} \quad y = -\frac{y_0}{x_0} x.$$

3. При $\varphi_0 = \pi/2$ получим уравнение эллипса (рис. 3)

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} = 1.$$

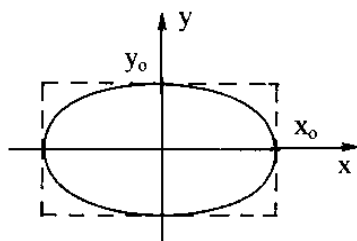


Рисунок 3

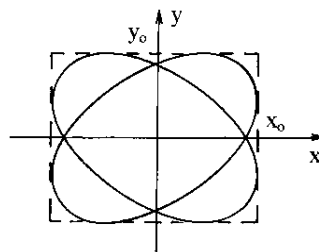


Рисунок 4

4. В случае произвольных значений φ_0 фигура Лиссажу будет иметь вид эллипса, как показано на рис. 4.

Таким образом, при $n = 1$ суммарное колебание происходит в общем случае по эллипсу. Вид эллипса определяется разностью начальных фаз φ_0 .

Более сложные кривые получаются при неравных частотах ($n \neq 1$). Если $n = \frac{\omega_y}{\omega_x}$ не является рациональным числом, то кривая будет незамкнутой (неповторяющейся) и с течением времени заполнит весь прямоугольник со сторонами $2x_0$ и $2y_0$.

Если n - рациональное число, т.е. $n = \frac{n_x}{n_y}$, где n_x и n_y - целые числа, то

уравнение (2) будет определять различные кривые, вид которых зависит от значения n и разности начальных фаз φ_0 . Вид различных фаз показан на рис. 5.

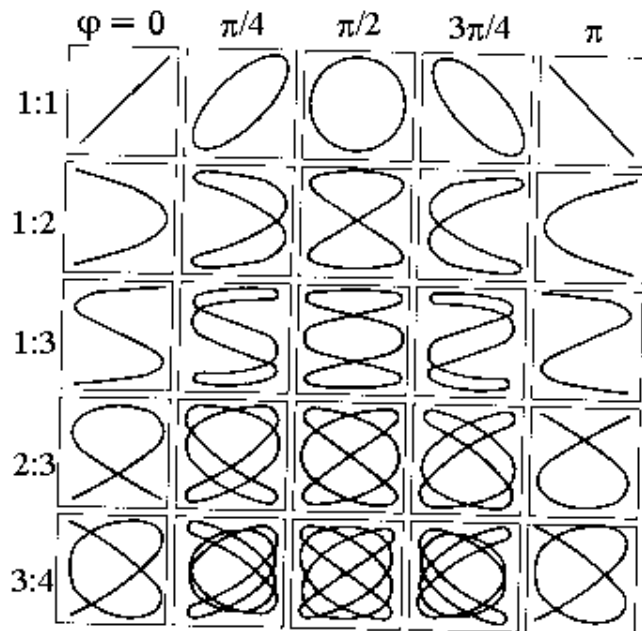


Рисунок 5

$$n = \frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{T_x}{T_y} = \frac{n_x}{n_y},$$

где ω_x , ν_x , T_x и ω_y , ν_y , T_y - соответственно частоты и периоды колебаний в направлениях X и Y. Тогда $n_y T_x = n_x T_y = \Delta t$, где Δt - промежуток времени, за который точка совершит n_x полных колебаний в направлении оси Y и n_y пол-

ных колебаний в направлении оси X. За следующий промежуток времени $\Delta t = \Delta t_l$ колебания в точности повторяются.

В результате колебания будут накладываться друг на друга и дадут замкнутую устойчивую фигуру Лиссажу.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Электронный осциллограф.
2. Звуковой генератор.
3. Лабораторный автотрансформатор с вольтметром (ЛАТР).

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В настоящей работе сравнение частот производится с помощью электронного осциллографа.

Для этого на Y-вход осциллографа подается синусоидальное напряжение от звукового генератора, а на X-вход - синусоидальное напряжение с частотой $\omega = 2\pi\nu$ ($\nu = 50$ Гц) от клеммы «контрольный сигнал» на осциллографе. (Синусоидальное напряжение с $\nu = 50$ Гц можно подавать на X-вход от сети переменного тока через ЛАТР).

В результате сложения двух взаимно перпендикулярных напряжений с частотами $\frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{n_x}{n_y}$, где n_x и n_y - целые числа, на осциллографе получится замкнутая устойчивая кривая (фигура Лиссажу). Тогда

$$\nu_y = \nu_x \cdot \frac{n_x}{n_y}. \quad (5)$$

Для определения отношения $\frac{n_x}{n_y}$ рекомендуется использовать следующее правило. Проводятся взаимно перпендикулярные координатные оси X и Y через полученную фигуру Лиссажу. Подсчитываем число точек пересечения кривой с осью X (n_x) и с осью Y (n_y).

В случае, когда ось проходит через точку пересечения ветвей кривой (точка А, рис. 7), при подсчете ее считают дважды. Для фигуры Лиссажу, изображенной на рис. 7: $n_x = 3$; $n_y = 4$, т.е.

$$\frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{3}{4}.$$

6. ХОД РАБОТЫ

1. Собрать схему в соответствии с рис. 6.
2. Выключить генератор развертки осциллографа (рукоятка «диапазон частот» в положение «выкл.») и устанавливают рукоятки усиления по осям X и Y на ноль. Рукоятка ЗГ «амплитуда» также устанавливается на ноль.

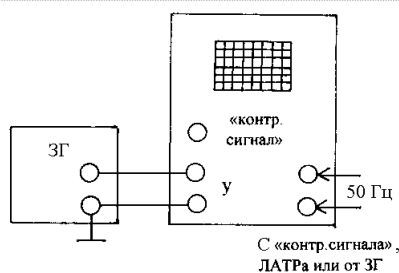


Рисунок 6

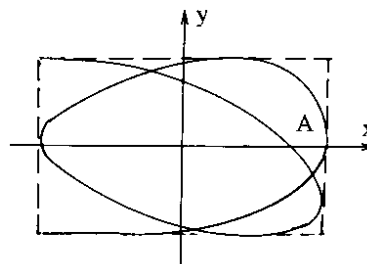


Рисунок 7

3. Включить в цепь звуковой генератор, осциллограф и ЛАТР (ЛАТР включается в цепь, если у осциллографа нет «Контрольного сигнала»).

4. Сфокусировать световое пятно на экране осциллографа.

5. Увеличивая амплитуду сигнала от звукового генератора и меняя его частоту (поворотом лимба генератора), получить ряд фигур Лиссажу и по их форме определить частоту сигнала звукового генератора при данном положении его лимба.

6. Зарисовать наблюдаемые фигуры Лиссажу как показано на рис. 5 и записать в таблицу найденную частоту и показания лимба ЗГ.

7. Построить градуировочный график, откладывая по оси абсцисс деления ЗГ, а по оси ординат соответствующие частоты.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким способом можно определить частоту неизвестного гармонического сигнала?

2. Как определить разность начальных фаз для двух сигналов с равной частотой?

3. Физическая интерпретация фигур Лиссажу.

4. Как определить частоту неизвестного сигнала по внешнему виду фигуры Лиссажу?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 17**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Изучение влияния емкости и активного сопротивления контура на параметры затухающих колебаний.
2. Определение логарифмического декремента затухания, коэффициента затухания, добротности колебательного контура.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: Учеб. пособие для студентов вузов.- [В 3-х т.].- Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - М.: Наука, 1989. - 301 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.
4. Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике: учеб. пособие для медвузов / Под ред. А.А. Ремезова. - М.: Высш. шк., 1987. - 271 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим колебательный контур, состоящий из конденсатора емкостью C , катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис. 1).

Так как рассматриваемый контур содержит активное сопротивление R , то при протекании электрического тока в резисторе выделяется тепловая энергия и электромагнитные колебания будут затухающими.

Определим период затухающих колебаний и найдем закономерности изменения заряда на конденсаторе со временем.

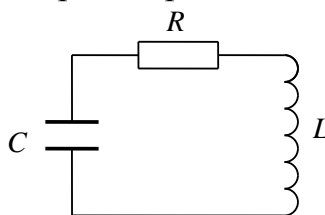


Рисунок 1

При разряде конденсатора в катушке индуктивности возникает ЭДС самоиндукции $E = -L \frac{di}{dt}$, которая по второму закону Кирхгофа равна сумме падений напряжений на конденсаторе $U_C = \frac{q}{C}$ и активном сопротивлении $U_R = iR$, т.е.

$$-L \frac{di}{dt} = iR + \frac{q}{C}. \quad (1)$$

Так как $i = dq/dt$, то выражение (1) можно привести к виду

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (2)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{R}{L} = 2\beta, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC},$$

где β - коэффициент затухания; ω_0 - собственная частота электромагнитных колебаний контура.

Тогда с учетом вводимых обозначений уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (3)$$

Выражение (3) является дифференциальным уравнением затухающих электромагнитных колебаний рассматриваемого колебательного контура, решение которого имеет вид

$$q = q_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где q_0 - максимальный заряд на обкладках конденсатора; $A(t) = q_0 \exp(-\beta t)$ - амплитуда затухающих колебаний в момент времени t ;

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad (5)$$

где ω - круговая частота затухающих колебаний.

На рис. 2 показана зависимость заряда на конденсаторе от времени.

Для характеристики быстроты затухания колебаний вводится величина, называемая логарифмическим декрементом затухания

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}, \quad (6)$$

где $A(t)$ и $A(t+T)$ - значения амплитуд, соответствующих моментам времени, отличающимся на период.

$$\text{Так как } A = A_0 e^{-\beta t}, \text{ то } \lambda = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T.$$

$$\text{Отсюда } \beta = \frac{\lambda}{T} \text{ и } A(t) = A_0 e^{-\frac{\lambda}{T} t}.$$

За время τ , в течение которого амплитуда колебаний уменьшится в e раз, система успеет совершить $N_e = \tau/T$ колебаний. Из условия

$e^{-\lambda \frac{\tau}{T}} = e^{-1}$ получится, что $\lambda \frac{\tau}{T} = \lambda N_e = 1$. Отсюда $\lambda = 1/N_e$. Следовательно, логарифмический декремент затухания обратно пропорционален по величине

числу колебаний, совершаемых за то время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

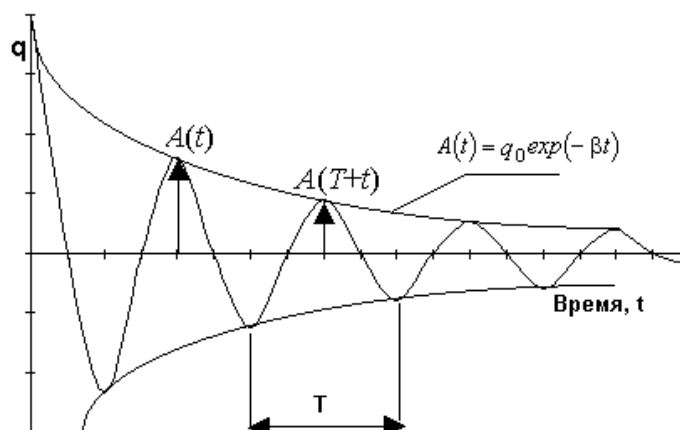


Рисунок 2

Одной из основных характеристик колебательного контура является его добротность:

$$Q = \pi / \lambda.$$

Поскольку $\lambda = 1/N_e$, то $Q = \pi N_e$. Следовательно, добротность пропорциональна числу колебаний N_e , совершаемых системой за время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в e раз.

Можно также доказать, что добротность с точностью до множителя 2π равна отношению энергии, запасенной в системе в данный момент, к убыли энергии за один период колебаний.

Соотношение (5) может быть использовано для экспериментального определения емкости колебательного контура.

Так как $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то подставляя значения ω и ω_0 в уравнение (5), получаем выражение

$$\frac{1}{LC} = \frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2.$$

Из последнего соотношения нетрудно найти емкость колебательного контура:

$$C = \frac{1}{L\left(\frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2\right)}. \quad (7)$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Генератор прямоугольных импульсов.
2. Электронный осциллограф.
3. Экспериментальная установка.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА РАБОТЫ

На рис. 3 изображена схема экспериментальной установки для изучения затухающих электромагнитных колебаний.

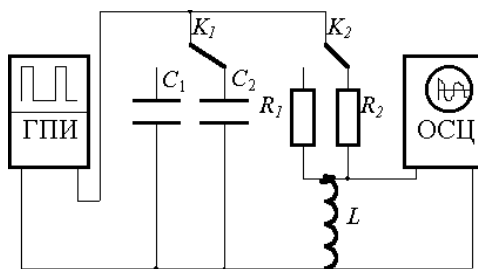


Рисунок 3

Установка состоит из катушки индуктивности L , значение которой задается при выполнении работы, конденсаторов C_1 и C_2 , резисторов R_1 и R_2 , генератора прямоугольных импульсов (ГПИ) и электроннолучевого осциллографа (ОСЦ). С помощью переключателей K_1 и K_2 в колебательный контур можно поочередно подключать конденсаторы C_1 и C_2 , резисторы R_1 и R_2 . Таким образом, данная установка позволяет получить четыре колебательных контура: R_1C_1L , R_2C_1L , R_1C_2L , R_2C_2L . При подаче на контур импульсного напряжения (частота и длительность импульсов подбираются экспериментально) на экране осциллографа наблюдается картина затухающих электромагнитных колебаний.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установите переключатели K_1 и K_2 в положения, соответствующие включению в цепь контура R_1C_1L .

2. Включите осциллограф и генератор прямоугольных импульсов. Получите на экране устойчивую картину затухающих колебаний и зарисуйте её на миллиметровой бумаге.

3. Измерьте величину трех пар последовательных амплитуд колебаний. Результаты измерений занесите в табл. 1.

4. Рассчитайте логарифмический декремент затухания по измеренным значениям последовательных амплитуд и определите его среднее значение $\langle \lambda \rangle$.

5. Рассчитайте добротность колебательного контура по формуле

$$Q = \frac{\pi}{\langle \lambda \rangle}.$$

6. Определите длительность 4...7 колебаний и рассчитайте период затухающих колебаний.

7. Найдите коэффициент затухания по формуле

$$\beta = \frac{\langle \lambda \rangle}{T}.$$

Т а б л и ц а 1

Контур	R_1	C_1	L	R_2	C_2	L	R_1	C_2	L	R_2	C_1	L
Параметры	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$A(t)$, мм												
$A(t+T)$, мм												
$\lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$												
$\langle \lambda \rangle$												
$Q = \pi / \langle \lambda \rangle$												
T , с												
$\beta = \frac{\langle \lambda \rangle}{T}$, с ⁻¹												
$R = 2\beta L$, Ом												
$C = \frac{1}{L(\frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2)}$, Ф												
L , Гн												

8. Определите величину активного сопротивления контура по формуле

$$R = 2\beta L.$$

9. Рассчитайте емкость колебательного контура по формуле

$$C = \frac{1}{L(\frac{4\pi^2}{T^2} + \beta^2)}.$$

10. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.

11. Изменяя положение переключателей K_1 и K_2 , проведите аналогичные измерения и расчеты для колебательных контуров: R_2C_1L , R_1C_2L , R_2C_2L .

12. Оцените погрешности измерений (по заданию преподавателя): логарифмического декремента затухания; периода колебаний; добротности; коэффициента затухания; величины активного сопротивления; величины емкости колебательного контура.

13. Сделайте краткие выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Получите дифференциальное уравнение для затухающих электромагнитных колебаний и проанализируйте его решение.

2. Дайте определение логарифмического декремента затухания и добротности колебательного контура.

3. Объясните методику определения величины активного сопротивления и ёмкости колебательного контура.

4. Объясните методику расчета погрешностей измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 18

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение работы последовательного колебательного контура, снятие его резонансных характеристик и определение добротности контура.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

- 1 Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.1: Механика. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1989. - 350 с.
- 2 Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
- 3 Черкашин В.П. Физика. Электричество и магнетизм. - Киев: Выща шк., 1986. - 168 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Принципиальная схема последовательного колебательного контура изображена на рис. 1. Чтобы в контуре совершались вынужденные колебания, необходимо включить последовательно с элементами контура переменную ЭДС, создающую на контактах разрыва цепи переменное напряжение $U = U_m \cos(\omega t)$.

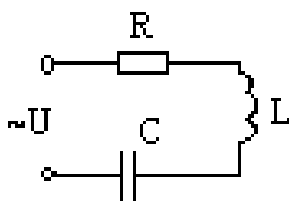


Рисунок 1

Уравнение колебательного контура для вынужденных колебаний имеет вид

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos(\omega t),$$

где собственная частота колебаний контура ω_0 и коэффициент затухания β определяются по формулам

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{R}{2L}.$$

При установившихся вынужденных колебаниях изменение величины заряда на обкладках конденсатора описывается уравнением

$$q = q_m \cos(\omega t - \psi),$$

где

$$q_m = \frac{U_m / L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 2\beta^2 \omega^2}} = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}};$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}.$$

Сила тока в контуре при установившихся колебаниях изменяется по закону

$$i = \dot{q} = \omega q_m \cos(\omega t - \varphi) = I_m \cos(\omega t - \varphi),$$

где $\varphi = \psi \pm \pi/2$ - сдвиг по фазе между током в контуре и приложенным напряжением U . Значения I_m и φ определяется из формул

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (1)$$

и

$$\operatorname{tg} \omega = -\frac{1}{\operatorname{tg} \psi} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (2)$$

Можно считать, что сумма падений напряжения в колебательном контуре равна напряжению, приложенному к нему

$$U_R + U_C + U_L = U_m \cos \omega t,$$

где напряжения на каждом из элементов контура равны

$$U_R = RI_m \cos(\omega t - \varphi),$$

$$U_C = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t - \psi) = U_{Cm} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}),$$

$$U_L = U_{Lm} \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}).$$

Значения U_{Cm} и U_{Lm} связаны с I_m соотношениями

$$U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega C} \quad \text{и} \quad U_{Lm} = \omega L I_m.$$

Фазовые соотношения между U_R , U_C и U_L можно представить с помощью векторной диаграммы, показанной на рис. 2. Напряжение на ёмкости отстаёт по фазе от тока на $\pi/2$, а на индуктивности опережает ток на $\pi/2$.

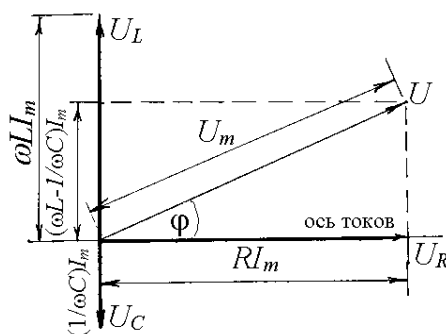


Рисунок 2

Напряжение на активном сопротивлении изменяется в фазе с током. При

$\omega L > \frac{1}{\omega C}$ приложенное к контуру напряжение U опережает ток по фазе и $\varphi > 0$ (в соответствии с формулой (2)); при $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ ток будет опережать напряжение и $\varphi < 0$. При $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ток в контуре будет определяться значением активного сопротивления R и будет максимальным:

$$I_m = I_{m \text{ рез.}} = \frac{U_m}{R}.$$

Это явление называется резонансом напряжений, так как при этом напряжение на конденсаторе U_C в каждый момент времени будет равно по величине напряжению на индуктивности U_L , но противоположно ему по фазе. Резонансная частота для тока в контуре $\omega_{i \text{ рез.}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$, т.е. резонансная частота для тока равна собственной частоте контура.

Кривая зависимости амплитуды силы тока в контуре I_m от частоты внешнего источника ω (формула (1)) называется резонансной кривой для тока. Вид этой кривой для различных значений коэффициента затухания β показан на рисунке 3, из которого видно, максимум при резонансе тем выше и острее, чем меньше активное сопротивление R и больше индуктивность L . При $\omega = 0$ ток $I = 0$, т. е. при постоянном напряжении установившийся ток в цепи с конденсатором проходить не может.

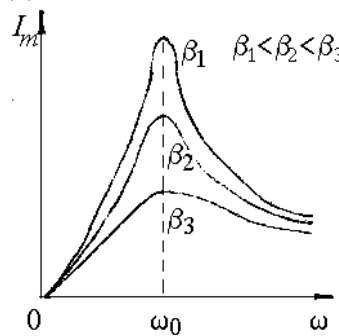


Рисунок 3

Амплитудное значение напряжения на конденсаторе U_{cm} также зависит от частоты ω внешнего источника ЭДС. При этом максимальное значение U_{cm} достигается при частоте

$$\omega_{U \text{ рез.}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} \leq \omega_0,$$

называемой резонансной частотой для напряжения, которая в реальном контуре меньше собственной частоты контура ω_0 .

Вид резонансных кривых для напряжения на конденсаторе показан на рис. 4 для различных β . При $\omega \rightarrow 0$ резонансные кривые сходятся в одной точке с ординатой $U_{cm} = U_m$ равной напряжению на конденсаторе при подключении его к источнику постоянного напряжения U_m .

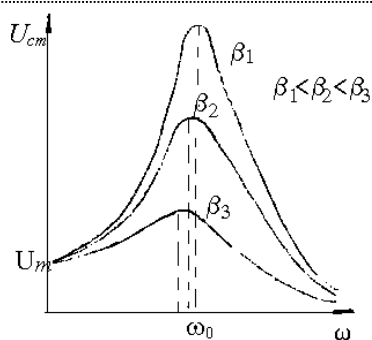


Рисунок 4

Широко используемой характеристикой колебательного контура является его добротность Q . Это безразмерная величина, характеризующая относительную величину потерь энергии в контуре: $Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W}$, где ΔW - потеря энергии за один период и W - энергия в контуре в данный момент. Добротность связана с логарифмическим декрементом затухания λ и числом колебаний N_e , совершаемых за промежуток времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз, соотношением

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e.$$

При малом затухании ($\beta^2 \ll \omega_0^2$)

$$Q = \frac{U_{ст рез}}{U_m} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Таким образом, добротность контура показывает, во сколько раз напряжение на конденсаторе контура может превышать приложенное напряжение.

Добротность контура определяет также остроту резонансных кривых. На рис. 5 показана ширина резонансной кривой $\Delta\omega$ для амплитуды тока, равной $0,7I_{рез}$, что соответствует $0,7^2 \approx 0,5$ мощности при резонансе. Можно показать, что при малом затухании

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}, \quad (3)$$

т.е. чем меньше ширина резонансной кривой, тем выше добротность.

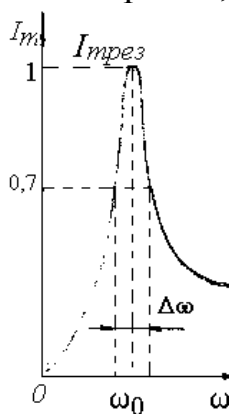


Рисунок 5

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Звуковой генератор.
2. Электронный осциллограф.
3. Переменный резистор.
4. Катушка индуктивности.

5. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для изучения вынужденных колебаний в контуре используется установка, изображенная на рис. 6, а. С помощью этой установки можно изучать зависимость амплитудного напряжения на конденсаторе U_{cm} от частоты ω внешнего источника эдс. При этом на вход Y осциллографа подается напряжение с конденсатора C. В качестве внешнего источника переменного напряжения используется звуковой генератор ЗГ. Активное сопротивление контура можно менять с помощью переменного резистора R.

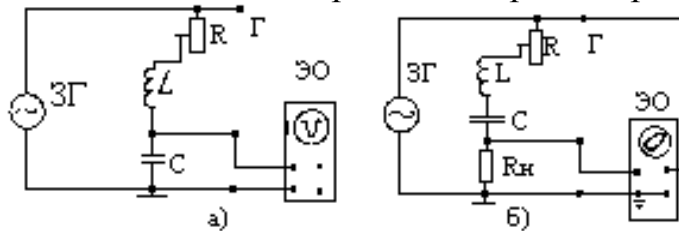


Рисунок 6

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить осциллограф и звуковой генератор в сеть и дать им прогреться 5...7 минут.
2. Установить на выходе генератора напряжение до 3 В.
3. Усиление осциллографа и его временную развертку установить так, чтобы на экране наблюдалось около 10 периодов колебаний.
4. Меняя частоту генератора ω_i и усиление на входе Y осциллографа добиваемся того, чтобы при резонансе (максимальная амплитуда $U_{Cmpрез}$) сигнал не выходил за рамки экранной сетки. Сопротивление контура должно быть при этом минимальным.

5. Снять зависимость амплитуды напряжения U_{Cmi} (в делениях экранной сетки осциллографа) от частоты ω_i (всего 8...10 измерений). Резонансные значения должны находиться примерно посередине диапазона измерений. Зависимость $U_{Cmi}(\omega_i)$ снять для разных значений сопротивления R_i . Результаты измерений занести в табл. 1.

6. Не меняя усиления входа Y осциллографа, подать на этот вход вместо исследуемого напряжения U_{cm} напряжение непосредственно со звукового генератора (клемма Г). Определить амплитудное значение напряжения генератора U_m (также в делениях сетки экрана). Напряжение U_m должно слабо зависеть от R, поэтому можно ограничиться измерением этого напряжения только для одного значения активного сопротивления.

Измерить напряжение, подаваемое от звукового генератора U_m . Для это-

го напряжение с клеммы Г подать на вход вольтметра, отсоединив от него конденсатор (рис. 6, а).

Т а б л и ц а 1

$R(\text{кОм})$		1	2	3	4	5 (резонанс)	6	7	8	9
$R_1=0$	ω_i									
	U_{cmi}									
$R_2=10$	ω_i									
	U_{cmi}									
$R_3=20$	ω_i									
	U_{cmi}									
$R_4=30$	ω_i									
	U_{cmi}									

7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 1 построить резонансные кривые $U_{cm} = U(\omega)$ для различных R .

2. По результатам графического измерения ширины резонансных кривых $\Delta\omega$ определить добротность контура для разных R по формуле (3). Результаты занести в табл. 2. Построить график зависимости $Q = Q(R)$.

Т а б л и ц а 2

Добротность	С о п р о т и в л е н и е			
	R_1	R_2	R_3	R_4
$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$				
$Q = \frac{U_{cm рез}}{U_m}$				

3. Определить добротность контура $Q = \frac{U_{cm рез}}{U_m}$ для разных R . Результаты занести в табл. 2. Нанести полученные точки на график $Q = Q(R)$ и сравнить полученные результаты.

8. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Определить сдвиг фаз между током в цепи и приложенным напряжением в зависимости от частоты внешней ЭДС, т.е. снять фазовую характеристику колебательного контура $\varphi = \varphi(\omega)$.

Для снятия фазовой характеристики контура используется та же экспериментальная установка, что и при выполнении основного задания. С помощью переключателя можно перейти от схемы, показанной на рис. 6, а), к схеме на рис. 6, б). При этом на вход Y осциллографа подается напряжение, пропорциональное току в контуре, а на вход X - напряжение звукового генератора.

Подобрав соответствующее усиление по каналам X и Y, получим на экране эллипс, являющийся результатом сложения двух взаимно перпенди-

кулярных колебаний. Ориентация эллипса относительно координатных осей зависит от угла сдвига фаз φ (формула (2)), который, в свою очередь, зависит от частоты ω . Измеряя полуоси эллипса a и b , можно определить сдвиг фаз φ :

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{a}{b} \quad \text{и} \quad \varphi = 2 \operatorname{arctg} \frac{a}{b}.$$

В задании необходимо определить сдвиг фаз для различных значений частоты внешней ЭДС. Для этого, изменяя частоту генератора ω вблизи резонансной частоты (резонанс соответствует вырождению эллипса в прямую), измерить полуоси эллипса на экране и занести данные в табл. 3. Опыт проделать для 2...3 значений R .

Т а б л и ц а 3

R_1				R_2			
ω	a , мм	b , мм	φ	ω	a , мм	b , мм	φ

По данным таблицы 3 построить фазочастотные характеристики $\varphi = \varphi(\omega)$. Примерный вид фазочастотной характеристики показан на рис. 7.

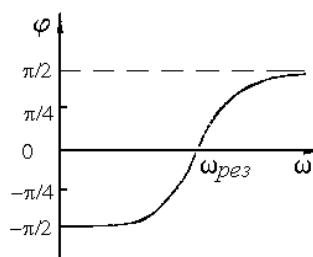


Рисунок 7

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Выведите уравнение установившихся вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре.
2. Опишите фазовые соотношения между силой тока и напряжением на емкости и индуктивности в последовательном колебательном контуре при вынужденных колебаниях.
3. Изобразите векторную диаграмму напряжений для колебательного контура при вынужденных колебаниях.
4. Объясните, что такое "резонансное напряжение". Изобразите резонансные кривые для тока и напряжения на емкости в колебательном контуре.
5. Укажите, какой вид имеет векторная диаграмма напряжений при резонансе.
6. Объясните, что такое добротность контура.
7. Напишите вид уравнения результирующего колебания, получающегося при сложении двух взаимноперпендикулярных колебаний одинаковой частоты.

8. Укажите при какой разности фаз складываемых взаимноперпендикулярных колебаний результирующее движение будет совершаться: а) вдоль прямой; б) по окружности?

9. Изобразите, как изменяются характеристики резонансных кривых с изменением добротности.

10. Опишите как проводится эксперимент с целью получения данных, необходимых для построения резонансных кривых для напряжения.

11. Объясните, что такое ширина резонансной кривой и каков ее физический смысл.

12. Опишите метод измерения сдвига фаз.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 19

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ЕМКОСТИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение процессов разряда конденсаторов в RC -цепочке.
2. Определение постоянной времени цепи и емкости конденсатора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - М.: Наука, 1978. - Т.2.: Электричество и магнетизм. Волны Оптика. - 480 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб и доп. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1. RC -цепочка, постоянная времени и разряд конденсатора

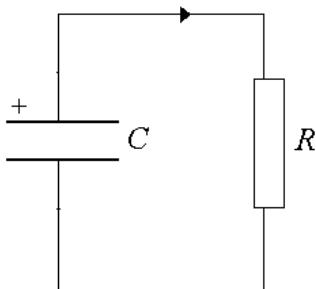


Рисунок 1

Рассмотрим цепь, состоящую из конденсатора C и сопротивления R (рис. 1). Сообщим обкладкам конденсатора разноименные заряды. Тогда в цепи возникнет электрический ток I и заряд на обкладках конденсатора будет убывать. Если U – мгновенное значение напряжения на обкладках конденсатора, R – сопротивление резистора, то по закону Ома сила тока I в цепи равна

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Учитывая, что $U = \frac{q}{C}$, выражение (1) записывается в виде $I = \frac{q}{RC}$ и его дифференциал может быть представлен следующим образом (RC – постоянная величина):

$$dI = \frac{dq}{RC}. \quad (2)$$

Подставляя $dq = -Idt$ (знак минус указывает на убыль заряда на пластинах конденсатора при его разряде), получим дифференциальное уравнение, описывающее закономерность изменения тока в данной цепи:

$$dI = -\frac{Idt}{RC}. \quad (3)$$

Решим дифференциальное уравнение (3) методом разделения переменных:

$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{RC}. \quad (4)$$

Если в начальный момент времени ток равен I_0 , то, проинтегрировав выражение (4):

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^t -\frac{dt}{RC},$$

получим

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{t}{RC}. \quad (5)$$

Потенцируя последнее соотношение, найдем ток I :

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (6)$$

где $\tau = RC$ называется постоянной времени цепи.

Выясним физический смысл постоянной времени τ : при $t = \tau$, из уравнения (6) следует, что $I = \frac{I_0}{e}$. Таким образом, постоянная времени τ равна тому промежутку времени, при котором сила тока в цепи уменьшается в e раз. Чем больше эта величина, тем медленнее спадает сила тока в цепи, содержащей емкость и постоянное сопротивление.

3.2 Методика определения постоянной времени и емкости конденсатора

Из выражения (5) следует, что $\ln \frac{I_0}{I} = \frac{t}{RC}$. Таким образом, $\ln \frac{I_0}{I}$ линейно зависит от времени t , при этом тангенс наклона прямой равен $tq\varphi = \frac{1}{RC}$ и данная прямая линия должна проходить через начало координат.

Построив в полулогарифмическом масштабе зависимость $\ln \frac{I_0}{I}$ как функцию времени, можно найти постоянную времени цепи и емкость конденсатора.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Лабораторная установка для исследования разряда конденсатора и измерения его емкости.
2. Цифровой мультиметр М-83, микроамперметр на 50 мкА, две батарейки.
3. Секундомер.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 2 представлена электрическая схема лабораторной установки для исследования процесса разряда конденсатора и измерения его емкости. В

работе применяются электролитические конденсаторы емкостью 400...2500 мкФ, рассчитанные на напряжение 6...12 В. Резистор R имеет сопротивление 100...150 кОм. Для измерения тока применяется микроамперметр на 50 мкА или мультиметр DT – 830. Напряжение измеряется мультиметром.

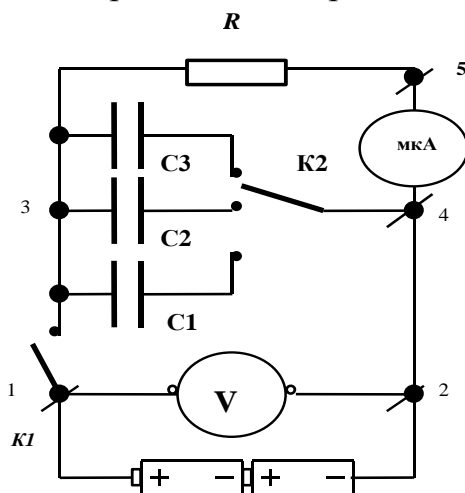


Рисунок 2

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с установкой, подключите к клеммам 4 и 5 микроамперметр для измерения тока. Тумблер $K2$ установите в нижнее положение. При таком положении в цепь подключается конденсатор $C1$. В среднем и в верхнем положении тумблера подключаются соответственно конденсаторы $C2$ и $C3$.

2. Замкните ключ $K1$, определите начальный ток I_0 . Значение начального тока запишите в табл. 1.

3. Отключите источник постоянного тока от конденсатора. Для этого выключите ключ $K1$ и включите секундомер. Конденсатор начнет разряжаться через сопротивление резистора, ток со временем будет уменьшаться.

4. Снимите 10...15 показаний силы тока через каждые 10...20 с. Результаты измерений запишите в табл. 1.

5. Повторите измерения для среднего и верхнего положения тумблера $K2$. Результаты измерений запишите в табл. 1.

6. Рассчитайте для всех значений времени величины $\frac{I_0}{I}$ и $\ln \frac{I_0}{I}$.

7. По данным табл. 1 постройте графики зависимостей $\ln \frac{I_0}{I}$ от времени для различных емкостей. По вертикальной оси (оси ординат) откладывайте значения, $\ln \frac{I_0}{I}$ по горизонтальной оси (оси абсцисс) – время t .

8. Экспериментальный график должен представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат. Построение графика необходимо делать с использованием метода наименьших квадратов.

9. По графику определите тангенс угла наклона экспериментальной прямой к оси времени $tq\varphi = \frac{I_0/I}{t} = \frac{1}{RC}$ и по известному значению сопротивления резистора R рассчитайте емкость конденсатора C .

Т а б л и ц а 1

Положение тумблера <i>K2</i>	Время, <i>t</i> , с	<i>I</i> , мкА	$\frac{I_0}{I}$	$y = \ln \frac{I_0}{I}$	<i>tqφ</i>	$C, \text{ мкФ}$ $C = \frac{1}{Rtq\varphi}$
Нижнее	0					
	10					
	20					
	30					
					
	100					
Среднее	0					
	10					
	20					
	30					
					
	100					
Верхнее	0					
	10					
	20					
	30					
					
	100					
Емкость, <i>C</i> , мкФ	<i>C1</i> =		<i>C2</i> =		<i>C3</i> =	
Сопротивление, <i>R</i> , Ом			<i>R</i> =			

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дайте физическое объяснение процессов, происходящих при разряде конденсатора. Получите зависимость силы тока от времени при разряде конденсатора через активное сопротивление.

2. Объясните методику определения электрической емкости в данной лабораторной работе.

3. В чем состоит физический смысл постоянной времени $\tau = RC$ цепи?

4. Объясните почему при включении электролитического конденсатора в цепь необходимо учитывать его полярность.

5. Как будет влиять на время заряда и разряда конденсатора изменение напряжения источника постоянного тока, изменение сопротивления резистора?

6. Какую опасность представляют обесточенные цепи с заряженными конденсаторами?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 20

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОМЕТРИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомление с основными понятиями фотометрии.
2. Ознакомление с устройством и получение навыков работы с люксметром Ю 117.
3. Проведение фотометрических измерений.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. - М.: Наука, 1980. - 752 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Фотометрия – раздел оптики, занимающийся вопросами измерения интенсивности света и его источников. В фотометрии используют два вида величин, характеризующих оптическое излучение: энергетические и световые.

Энергетические фотометрические величины определяют временное, пространственное, спектральное распределение энергии оптического излучения, количественно выражаемые в единицах энергии или мощности или в производных от них. Чтобы измерить энергетические величины необходим универсальный приемник, например, термоэлемент, действие которого основано на превращении всей поглощенной световой энергии в тепловую. Однако гораздо чаще в качестве приемников излучения используют устройства, реакция которых зависит не только от энергии, приносимой светом, но также и от его спектрального состава. Такими весьма распространенными селективными приемниками являются фотопленка, фотоэлемент и особенно человеческий глаз, играющий исключительно важную роль и при повседневном восприятии света, и как приемник излучения во многих оптических приборах. Чувствительность глаза к свету различной длины волны можно охарактеризовать кривой относительной спектральной чувствительности (кривой видности), приведенной в приложении к данному учебному пособию (сплошная кривая относится к дневному зрению, пунктирная – к сумеречному). Как и глаз, другие приемники излучения характеризуются своей кривой чувствительности к свету различных длин волн. Поэтому световые измерения, являясь субъективными, отличаются от объективных, энергетических и для них вводятся световые единицы, используемые только для видимого света.

Для обозначения фотометрических величин разных видов ГОСТ 26148-84 (Фотометрия. Термины и определения) устанавливает подстрочные индексы e для энергетических и v для световых величин. Допускается не использовать эти индексы в обозначениях величин, когда исключена возможность их неоднозначного толкования. Поскольку ниже речь будет идти только о световых величинах индексы v не используются.

Основной световой величиной является сила света. Сила света I – величина, равная отношению светового потока к величине телесного угла, в котором распространяется световой поток:

$$I = \frac{\Phi}{\omega},$$

где I – сила света; Φ – световой поток; ω – телесный угол.

За единицу силы света I в международной системе СИ принимается кандела (кд) (лат. “kandela” – свеча).

Первоначально за канделу принималась сила света стеариновой или парафиновой свечи определенной массы. В 1979 г. на Генеральной конференции по мерам и весам принято определение канделы, однозначно связывающее световые единицы с энергетическими. Способ построения эталона канделы каждая страна выбирает самостоятельно. Таким образом размерность и единица силы света, как и всех основных величин СИ установлены произвольно: $\dim I = J$, $[I] = 1 \text{ кд}$.

Световой поток Φ , испускаемый изотропным точечным источником света в пределах телесного угла ω , в вершине которого находится источник, определяется формулой

$$\Phi = I \omega, \quad (1)$$

телесный угол ω можно определить по формуле

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \theta) = 4\pi \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2)$$

где θ – угол между осью конуса и его образующей. Размерность и единица светового потока:

$$\dim \Phi = J; \quad [\Phi] = 1 \text{ кд} \cdot \text{ср} \text{ (кандела – стерадиан)}.$$

Эта единица, называемая люменом (лм), равна световому потоку, испускаемому точечным источником силой света в 1 кд внутри телесного угла в 1 ср при равномерном поле излучения.

Освещенность E – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность к ее площади:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (3)$$

Размерность и единица освещенности:

$$\dim E = L^{-2} J, \quad [E] = 1 \text{ лм} / \text{м}^2.$$

Эта единица освещенности называется люкс (лк): 1 лк – освещенность поверхности, на 1 м^2 которой падает световой поток 1 лм. Освещенность, создаваемая изотропным точечным источником света, подчиняется закону «обратных квадратов»:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varepsilon, \quad (4)$$

где r – расстояние от поверхности до источника света; ε – угол падения лучей.

Яркость светящейся или отражающей поверхности – величина, равная

отношению силы света к площади σ проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную этому направлению:

$$L = \frac{I}{\sigma}, \quad (5)$$

где I сила света в направлении наблюдения; σ - площадь проекции светящейся поверхности.

Размерность и единица яркости: $\dim L = L^{-2} J$, $[L] = 1 \text{ кд} / \text{м}^2$.

Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м^2 при силе света 1 кд. Яркость – чрезвычайно важная величина, так как именно на яркость непосредственно реагирует глаз. Источники большой яркости (свыше $1,6 \cdot 10^5 \text{ кд} / \text{м}^2$) вызывают болезненное ощущение в глазу, поэтому при работе с ними используют различные приспособления, например темные защитные очки. Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям ($L = \text{const}$), называются ламбертовскими (подчиняющимися закону Ламберта) или косинусными – поток, посылаемый элементом такого источника, пропорционален $\cos \theta$.

Светимость светящейся или отражающей поверхности – это величина, равная отношению светового потока к площади светящейся или отражающей поверхности:

$$M = \frac{\Phi}{S}, \quad (6)$$

где Φ – световой поток, испускаемый поверхностью, S - площадь этой поверхности. Размерность и единица светимости:

$$\dim M = L^{-2} J, \quad [M] = 1 \text{ кд} / \text{м}^2.$$

Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 м^2 , испускающей световой поток 1 лм.

Светимость и яркость ламбертовского источника связаны простым соотношением

$$M = \pi L. \quad (7)$$

Удельная мощность источника света равна отношению потребляемой электрической мощности к силе света источника света:

$$p = \frac{P}{I}. \quad (8)$$

Единица удельной мощности:

$$[p] = 1 \text{ Вт} / \text{кд}.$$

Световая отдача источника света равна отношению светового потока к потребляемой электрической мощности:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}. \quad (9)$$

Единица световой отдачи:

$$[\eta] = 1 \text{ лм} / \text{Вт}.$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Люксметр Ю116.
2. Лампы накаливания с различными световыми характеристиками.
3. Мерная линейка или рулетка.
4. Установка для изучения элементов фотометрии.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки для изучения законов фотометрии представлена на рис. 1. Установка состоит из основания 1, мерной шкалы 2, лампы накаливания 3, ввернутой в патрон 4, люксметра, состоящий из фотоэлемента 5 и отсчетного прибора 6, отградуированного в единицах освещенности люксах (лк).

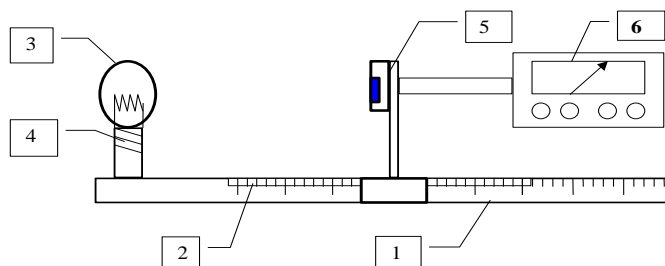


Рисунок 1

Работа с люксметром

Основным измерительным прибором, используемым в лабораторной работе, является фотоэлектрический люксметр Ю116, который предназначен для измерения освещенности, создаваемой лампами накаливания и естественным светом. Он состоит из измерителя (6), проградуированного в люксах, и селенового фотоэлемента (5) в отдельном корпусе. Фотоэлемент подключается к измерителю проводом со штепсельным разъемом. Для изменения диапазонов измеряемых значений освещенности предназначен комплект насадок, надеваемых на фотоэлемент.

До начала производства измерений внимательно ознакомьтесь с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации и применению люксметра. Неправильные, ошибочные действия могут вывести прибор из строя.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Определение освещенности, создаваемой лампами накаливания различной мощности и конструкции. Сопоставление результатов экспериментальных исследований.

1. Вкрутите лампу накаливания (3) в патрон (4), установите фотоэлемент люксметра на расстоянии 0,5 м от лампы накаливания, включите лампу накаливания в сеть 220 В и определите освещенность, создаваемую лампой, в месте расположения фотоэлемента.

2. Определите освещенность на расстояниях 1; 1,5; 2; 2,5 м от лампы. Результаты измерений запишите в табл. 1.

3. Повторите пункт 2 для ламп накаливания 40, 60 Вт с обычным и 60 Вт с молочным стеклом лампы. Результаты измерения запишите в табл. 1.

4. Сделайте краткие выводы по упражнению 1.

Т а б л и ц а 1

№	P , Вт	Расстояние, r , м					I , кд	Φ_0 , лм
		0,5	1.0	1.5	2.0	2.5		
1	15							
2	25							
3	40							
4	60							
5	75							

Упражнение 2. Проверка законов обратных квадратов. Расчет удельной мощности и световой отдачи.

Проверка законов обратных квадратов основана на анализе соотношения

(4). Если $\cos \varepsilon = 1$, то $E = \frac{I}{r^2}$. Отсюда

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{I} r^2. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что $\frac{1}{E}$ зависит от r^2 по линейному закону.

Видно, что прямая линия, соответствующая зависимости (10), должна проходить через начало координат, а котангенс угла наклона этой линии пропорционален силе света исследуемой лампочки. На этом основана проверка законов обратных квадратов и определение силы света лампочки.

Порядок выполнения упражнения 2

1. В соответствии с экспериментальными данными, представленными в таблице 1, постройте график зависимости $\frac{1}{E} = f(r^2)$, откладывая по вертикальной оси величину обратную освещенности $\left(\frac{1}{E}\right)$, а по горизонтальной оси

– квадрат расстояния от лампы до фотозлемента люксметра r^2 . График должен представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат. Прямую по точкам проводите, применяя метод наименьших квадратов. Если экспериментальная зависимость не совпадает с прямой, то соотношение (4) не выполняется.

2. Рассчитайте силу света исследуемой лампы по котангенсу угла наклона проведенной прямой ($\text{ctg} \alpha = I$). Результаты расчета запишите в табл. 1. Рассчитайте полный световой поток создаваемый лампой по формуле:

$$\Phi_0 = \omega I = 4\pi I.$$

Результаты расчета запишите в табл. 1.

3. Сделайте краткие выводы по упражнению 2.

Т а б л и ц а 2

Элек- трич. мощ- ность, P , Вт	Удельная мощность, $p = \frac{P}{I}$, Вт/кН	Световая отдача, $\eta = \frac{\Phi}{P}$, лм/Вт	Светимость $M = \frac{\Phi}{S}$, лм/м ² ($S = \pi d^2$)	Яркость, $L = \frac{I}{\sigma}$, кН/м ² ($\sigma = \frac{\pi d^2}{4}$)	Диаметр лампы, d , м
15					
25					
40					
60					
75					

Упражнение 3. Определение удельной мощности, световой отдачи источников света, расчет светимости и яркости неточечных источников света

1. Рассчитайте по формулам (8) и (9) удельную мощность p и световую отдачу η ламп различной мощности. Результаты расчета занесите в табл. 2.

2. Рассчитайте по формулам (5) и (6) светимость M и яркость L лампы с молочным стеклом. При расчетах считать $\sigma = \frac{\pi d^2}{4}$ (площадь круга),

$S = \pi d^2$ (площадь сферы), где d - диаметр колбы молочной лампы накаливания. Результаты расчета запишите в табл. 2.

3. Сделайте краткие выводы по упражнению 3.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Каковы должны быть мощности потоков оранжевого ($\lambda = 600\text{нм}$) и синего ($\lambda = 450\text{нм}$) света, создающей зрительное ощущение такой же интенсивности, как поток желто – зеленых лучей ($\lambda = 555\text{нм}$) мощностью 1 Вт? При расчете пользоваться кривой спектральной чувствительности глаза для дневного зрения.

2. Дать определения основных фотометрических величин, их размерностей и единиц.

3. Найти полный световой поток, испускаемый изотропным источником, сила света которого 10 кд.

4. Вывести формулу (4).

5. Определить удельную мощность (в ваттах на канделу) и световую отдачу лампы мощностью 75 Вт, создающей на расстоянии 3 м при нормальном падении лучей освещенность 8 лк.

6. Определить полный световой поток, светимость и яркость светильника из молочного стекла, имеющего форму шара диаметром 20 см. Сила света шара 80 кд.

7. Горящие уличные фонари в виде молочных шаров кажутся одинаково яркими с расстояния, например 20 м и 40 м. Как это объяснить?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 21

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение длины электромагнитной волны, исследование ее поляризации и интенсивности.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле в пространстве может существовать в виде волн. В работе изучается частный случай электромагнитной волны - монохроматическая волна, в которой векторы напряженности электрического и магнитных полей \vec{E} и \vec{H} изменяются в пространстве и во времени по гармоническому закону

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}),$$

$$\vec{H} = \vec{H}_m \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}), \quad (\omega = k \cdot c = \frac{2\pi c}{\lambda}),$$

где \vec{k} - волновой вектор; c - скорость света в вакууме. При этом вектор \vec{E} всегда перпендикулярен вектору \vec{H} и каждый из них перпендикулярен направлению распространения волны, которое определяется волновым вектором \vec{k} .

Для волн УКВ-диапазона (ультракоротких радиоволн волн ($\lambda \leq 0,3$ м), изучаемых в работе, характерна плоская (линейная) поляризация: колебания вектора \vec{E} происходят только в одной плоскости, определяемой векторами \vec{E} и \vec{k} .

Интенсивность I электромагнитной волны в вакууме пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля: $I = \left(\frac{1}{2}\right) c \varepsilon_0 E_m^2$, так что измеряя квадрат амплитуды напряженности электрического поля, можно с точностью до коэффициента определить интенсивность такой волны.

В качестве приёмника электромагнитной волны в работе используется диодный (кристаллический) высокочастотный детектор, имеющий приблизительно квадратичную зависимость тока от напряжения на начальном участке вольтамперной характеристики ($i \sim U^2$). Поэтому ток, проходящий через диод, пропорционален интенсивности электромагнитной волны ($i \sim U^2$, а $U_d \sim E_m$, т.е. $i \sim E_m^2 \sim I$). Помимо этого, такой приёмник обладает избирательностью по направлению колебаний электрического поля, что позволяет изучать

свойства поляризации электромагнитной волны. Например, плоскополяризованная электромагнитная волна подчиняется закону Малюса: интенсивность волны, измеренная детектором в плоскости, составляющей угол α с плоскостью колебаний вектора E , определяется как

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I_0 - интенсивность бегущей волны.

Закон Малюса легко объяснить, если учесть, что детектор реагирует только на проекцию вектора \vec{E} на ось самого детектора. Пусть E_0 - амплитуда напряжённости электрического поля падающей волны, тогда детектор будет воспринимать только составляющую с амплитудой $E_m = E_0 \cos \alpha$ (рис. 1).

Измеряемая детектором интенсивность $I \sim E_m^2$, отсюда и следует закон (1).

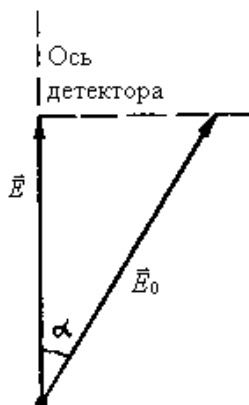


Рисунок 1

Если на пути плоской электромагнитной волны поставить отражающую поверхность, можно получить стоячую волну с распределением узлов (или пучностей) в пространстве через $\alpha/2$ для каждого из колеблющихся векторов \vec{E} и \vec{H} :

$$\vec{E}(x, t) = 2\vec{E}_m \cos \omega t \cdot \cos kx$$

(для стоячей волны между векторами \vec{E} и \vec{H} как во времени, так и в пространстве наблюдается сдвиг фаз на $\alpha/2$). Измеряя распределение узлов (или пучностей) напряжённости электрического поля стоячей электромагнитной волны вдоль направления распространения, можно определить длину волны.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Рупорный излучатель.
2. Кристаллический детектор.
3. Вольтметр.
4. Оптическая скамья.
5. Отражатель.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 2) состоит из генератора электромагнитных колебаний 1 с рупорным излучателем, металлического отражателя 6, детектора 2, милливольтметра и источника питания.

Напряжение U на нагрузочном сопротивлении детектора, пропорциональное току i детектора, измеряется милливольтметром. Детектор 2 укреплен на конце держателя 3, сделанного из пенопласта (диэлектрическая проницаемость пенопласта близка к диэлектрической проницаемости воздуха, поэтому зонд из пенопласта практически не искажает картину поля).

Держатель 3 может вращаться вокруг своей горизонтальной оси. Шкала 4 служит для отсчёта углов поворота детектора.

Кронштейн с детекторами и отсчётным устройством можно поступательно перемещать вдоль направляющей 5. Перемещение измеряют по линейке на направляющей.

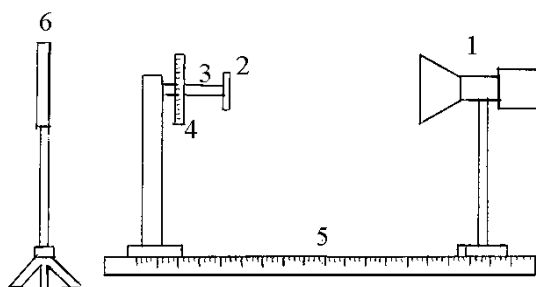


Рисунок 2

6. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Определение длины электромагнитной волны

Установите металлический отражатель 6 (рис. 2) напротив излучателя 1. Включите питание генератора и милливольтметра. Вращая детектор вокруг горизонтальной оси, найдите положение, при котором показания милливольтметра максимальны (положение детектора не должно совпадать с узлом электромагнитной волны). Добейтесь перпендикулярности расположения отражателя к направлению распространения волны: показания милливольтметра в узле должны быть близкими к нулю, а в пучности - наибольшими.

Снимите зависимость напряжения U детектора от его координаты x . Проведите не менее десяти измерений через 2...3 мм, особенно тщательно фиксируя положения пучностей и узлов. Постройте график зависимости $U(x)$ и по нему определите λ .

2. Проверка закона Малюса

Уберите отражатель. Установите детектор против излучателя (рис. 2) на расстоянии $l \geq 70$ см от последнего. Вращая детектор вокруг горизонтальной оси, снимите зависимость напряжения U детектора от угла поворота α (по лимбу 4). Снимите 20...25 показаний через 5° , фиксируя угловые положения максимумов и минимумов интенсивности волны. Постройте график $U(\alpha)$ и сравните с теоретической зависимостью $I(\alpha)$, нормируя теоретическую кривую по максимуму экспериментальной кривой.

3. Исследование зависимости интенсивности волны от расстояния

Приёмный детектор установите по максимуму показания милливольтметра. Перемещая излучатель 1, снимите зависимость напряжения U от

расстояния x между излучателем и детектором. Измерения проведите в интервале значений x от 40 до 80 см через каждые 5 см.

Постройте график зависимости $\lg U$ от $\lg x$. Вычислите тангенс угла наклона графика (для сферической волны $U \sim x^{-2}$, и тангенс угла наклона графика должен быть равным двум). Сделайте вывод о характере излучаемой волны.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите уравнение плоской и сферической электромагнитной волны. Как зависит интенсивность сферической волны от расстояния до источника?

2. Что представляет собой бегущая плоскополяризованная волна? Чем отличается стоячая электромагнитная волна от бегущей?

3. Поясните, как по зависимости $U(x)$, полученной в задании 1, определить длину электромагнитной волны.

4. Объясните, каким образом в данной работе проводится проверка закона Малюса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить показатель преломления стекла.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: Высш. шк., 1970. - 448 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В основе метода лежит явление кажущегося уменьшения толщины стеклянной пластины вследствие преломления световых лучей, проходящих через стекло при рассматривании пластинки нормально к ее поверхности. Схема прохождения лучей через пластинку приведена на рис. 1.

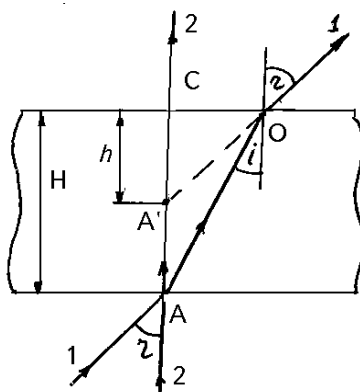


Рисунок 1

Луч 1, падающий на пластинку в точке А под углом r , преломляется и выходит из пластины в направлении ОD. Луч 2, падающий на пластинку в точке А нормально, проходит ее не преломляясь. Наблюдатель, рассматривающий пластинку сверху, увидит пересечение лучей 1 и 2 не в точке А, а в точке А'. Таким образом, толщина пластинки будет казаться равной А'С. Для лучей, близких к нормально падающим лучам, углы падения и преломления малы. В этом случае закон преломления можно записать в виде

$$n_{\text{стекла}} = \frac{\sin r}{\sin i} \cong \frac{\operatorname{tgr}}{\operatorname{tgi}}. \quad (1)$$

Из геометрии рисунка нетрудно видеть, что

$$\operatorname{tgr} = \frac{CO}{h}; \quad \operatorname{tgi} = \frac{CO}{H}.$$

Таким образом,

$$n_{\text{стекла}} = \frac{N}{h}. \quad (2)$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Микроскоп МБУ.
2. Микrometer.
3. Пластика из стекла.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить микrometerом истинную толщину пластики H .
2. Нанести на нижнюю и верхнюю поверхности пластики пересекающиеся штрихи.

3. Определить кажущуюся толщину стеклянной пластики h .

Для этого положить пластику на предметный столик микроскопа под объектив так, чтобы оба штриха пересекали оптическую ось прибора.

Перемещая тубус микроскопа, добиться четкого изображения штриха, расположенного на нижней поверхности пластики. Записать отсчет микрометрического винта микроскопа и принять его за нулевое деление.

Вновь переместить тубус микроскопа и получить четкое изображение штриха, расположенного на верхней поверхности пластики.

При нашем условии последнее перемещение тубуса микроскопа будет соответствовать кажущейся толщине пластики. Величина этого перемещения равна

$$h = (N \cdot z + 0,002 \cdot m) \text{ мм}, \quad (3)$$

где N - число полных оборотов барабана микрометрического винта; Z - шаг винта: $Z = 0,002 \times 50$ мм ("50" - число делений в одном полном обороте барабана; 0,002 мм/дел - цена одного деления барабана; m - число делений в неполном обороте барабана).

4. Измерения провести 10 раз. Результаты записать в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ опы-та	H , мм	ΔH , мм приборная	N	m	h_i , мм	Δh_i , мм	$(\Delta h_i)^2$, мм ²	$\langle n \rangle \pm \langle \Delta n \rangle$
1								
2								
3								
...								
9								
10								
$\langle h \rangle = \dots\dots\dots$							$\sum (\Delta h_i)^2 \dots\dots\dots$	

5. Вычислить среднее значение показателя преломления по формуле

$$\langle n \rangle = \frac{H}{\langle h \rangle}. \quad (4)$$

6. Вычислить доверительный интервал при надежности $\alpha = 0,95$:

$$\langle \Delta n \rangle = \sqrt{\frac{1}{h^2} \cdot (\Delta H)^2 + \frac{H^2}{h^4} \cdot (\Delta h)^2}. \quad (5)$$

7. Результаты записать в виде:

$$h = \langle n \rangle \pm \langle \Delta n \rangle, \quad \varepsilon = \frac{\langle \Delta n \rangle}{\langle n \rangle} \cdot 100\%.$$

8. Прodelать опыт по изучению зависимости показателя преломления от длины волны света, используя набор цветных стекол.

9. Построить график зависимости показателя преломления от длины световой волны $n = f(\lambda)$.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство микроскопа.
2. Начертите ход лучей в микроскопе.
3. Что называется показателем преломления и каков его физический смысл?
4. Объясните зависимость показателя преломления от длины волны падающего света.
5. Сформулируйте законы отражения и преломления света при его прохождении через твердые тела.
6. Выведите расчетные формулы (2) и (5).
7. Назовите другие, известные Вам, методы определения показателя преломления твердых тел. Дайте их краткое описание.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 23**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ
С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Ознакомление с принципом работы рефрактометра.
2. Определение показателя преломления различных растворов, установление зависимости показателя преломления от концентрации растворённого вещества и определение по ней неизвестной концентрации раствора.
3. Расчёт поляризуемости молекул растворённого вещества по значениям показателя преломления раствора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: Высш. шк., 1971. - 448 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Абсолютным показателем преломления n некоторой среды называется безразмерная величина, равная отношению скорости света в вакууме к фазовой скорости света в среде. Для прозрачной изотропной среды показатель преломления является действительной величиной, не зависящей от направления распространения света. Согласно теории Дж. Максвелла, показатель преломления $n = \sqrt{\epsilon_\nu \mu_\nu}$, где ϵ_ν и μ_ν - диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, соответственно, измеренные на частоте ν , и следовательно, определяется поляризуемостью частиц, из которых состоит среда. В оптической области спектра для всех прозрачных веществ $\mu \approx 1$, и $n \approx \sqrt{\epsilon_\nu}$, т.е. молекулы главным образом взаимодействует с электрической компонентой электромагнитного поля световой волны (световым вектором \vec{E}). Поскольку эти взаимодействия могут изменяться с частотой световой волны, то наблюдается зависимость её фазовой скорости, и соответственно, коэффициента преломления от частоты. Такая зависимость называется дисперсией света в среде. Для веществ, прозрачных в данной области спектра, имеет место нормальная дисперсия ($\partial n / \partial \lambda < 0$, где λ - длина волны). Для окрашенных веществ вблизи полос поглощения можно наблюдать аномальную дисперсию (т. е. $\partial n / \partial \lambda > 0$).

Природу уменьшения фазовой скорости света в среде классическая физика объясняет тем, что молекулы среды, совершая вынужденные колебания под действием света, периодически поляризуются и сами становятся источниками электромагнитного излучения аналогичного излучению осциллирующего элементарного диполя. Это новое поле от множества молекул, интер-

ферируя с исходным, изменяет его. Изменение поля волны эквивалентно тому, что происходит сдвиг фазы первоначальной волны. Из-за того, что сдвиг фазы пропорционален толщине материала, эффект в целом оказывается эквивалентным изменению фазовой скорости света в среде.

В области оптических частот диэлектрическая проницаемость обусловлена почти полностью электронной поляризуемостью. Доли ионной и ориентационной поляризуемостей малы из-за высокой инерционности молекул и ионов. Электронная поляризуемость α связывает локальное электрическое поле $\vec{E}_{\text{ло к}}$, действующее на молекулу, и индуцируемый дипольный момент молекулы \vec{p} ($\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_{\text{ло к}}$). Для приближенного теоретического расчёта показателя преломления n однокомпонентной среды можно воспользоваться формулой Клаузиуса-Моссотти

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}, \quad (1)$$

где N - число молекул в единице объёма; α - электронная поляризуемость; ϵ_0 - электрическая постоянная. Если среда представляет собой смесь нескольких компонент, то каждая из них даёт свой вклад в поляризацию среды. Полная поляризуемость в этом случае будет определяться суммой вкладов различных компонент смеси. В случае смеси двух веществ показатель преломления не будет средним двух показателей, а определяется через сумму двух молекулярных поляризуемостей α_1 и α_2 , например, в случае раствора сахара в воде - молекул воды и молекул сахара. Однако и в этом случае можно проводить расчёт по формуле (1), в которой $N\alpha = N_1\alpha_1 + N_2\alpha_2$, где N_1 , N_2 - число молекул воды и сахара в единице объёма, соответственно. Применимость данной формулы определяется тем, что сахар представляет собой молекулярный кристалл и переходит в раствор без ионизации и других химических изменений.

Измерив коэффициенты преломления чистого растворителя и раствора и предполагая, что поляризуемость воды при всех концентрациях одна и та же, можно рассчитать поляризуемости молекул воды и сахарозы ($C_{12}H_{12}O_{11}$).

Для измерения коэффициента преломления часто используют явление полного внутреннего отражения, наблюдаемое при падении электромагнитной волны на границу раздела двух сред со стороны оптически более плотной среды. Из закона Снелла $\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}$ при угле $\varphi_2 = \pi/2$ легко получить зна-

чение предельного угла ($\varphi_{\text{пр}}$) полного внутреннего отражения, которое однозначно связано с относительным показателем преломления граничащих сред. На рисунке 1 показан ход лучей при предельном угле полного внутреннего отражения. Механизм данного явления становится ясным из решения уравнений Максвелла для падающей, отражённой и преломлённой электромагнитных волн. Оказывается при углах падения больших $\varphi_{\text{пр}}$ "преломлённая волна" $E_2(t, x, z)$ будет иметь вид

$$E_2(t, x, z) \sim E_2^* e^{-\beta z} e^{-i(\omega t - kx)},$$

где t - время; ω - круговая частота; k - волновое число; E_2^* - амплитуда волны во второй среде.

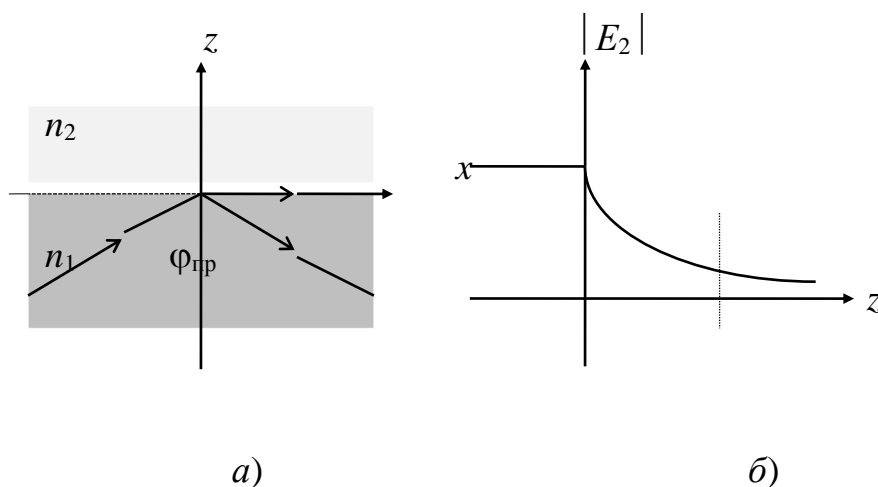


Рисунок 1

Таким образом, с увеличением z (ось z перпендикулярна границе) амплитуда волны во второй среде E_2^* будет экспоненциально падать с коэффициентом затухания β ($\beta \sim 1/\lambda$). Затухание волны в глубь среды при отсутствии в ней истинного поглощения (диссипации энергии) означает, что поток энергии из первой во вторую среду в среднем отсутствует (вектор Пойтинга во второй среде имеет лишь x -компоненту). Таким образом свет проникает за границу раздела во вторую среду на глубину порядка его длины волны. На рис. 1, б) показан спад амплитуды световой волны во второй среде. Отсюда можно сделать вывод, что в случае контакта двух сред с достаточно тонкой переходной областью предельный угол будет определяться только их коэффициентами преломления. Кроме того возможно определение коэффициента преломления окрашенных и мутных сред, так как поглощением света во второй среде при полном внутреннем отражении можно пренебречь.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Рефрактометр ИРФ-22.
2. Набор растворов различной концентрации.
3. Осветитель.
4. Фильтровальная бумага.
5. Термометр.

5. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Основными методами рефрактометрии являются:

- 1) метод прямого измерения углов преломления (точность примерно 10^{-5});
- 2) методы, основанные на явлении полного внутреннего отражения (ПВО) света (точность порядка 10^{-5});
- 3) интерференционные методы (точность порядка $10^{-7} \dots 10^{-8}$).

Наиболее широко распространены рефрактометры второго типа, так как они имеют следующие преимущества:

- 1) позволяют пользоваться источником белого света и при этом определять значение показателя преломления соответствующее стандартной длине волны (жёлтый дублет D-линии в спектре натрия, среднее значение $\lambda_D = 589,3 \text{ нм}$);
- 2) для измерения n жидкости достаточно всего несколько капель, а в случае твёрдого образца достаточно использовать лишь одну его грань;
- 3) наличие в приборе компенсационных призм Амичи позволяет определять удельную дисперсию показателя преломления ($1/n \cdot \partial n / \partial \lambda$);
- 4) образец достаточно легко термостатируется.

Для измерения коэффициента преломления прозрачных жидкостей используется так называемый метод скользящего луча, при котором по сравнению с полным внутренним отражением ход лучей обращён. На рис. 2 изображена схематично измерительная головка рефрактометра, состоящая из измерительной ABC и осветительной A'B'C' прямых треугольных призм (призмы Аббе), установленных с небольшим зазором так, что грани АВ и A'B' строго параллельны. Зазор заполнен исследуемой жидкостью.

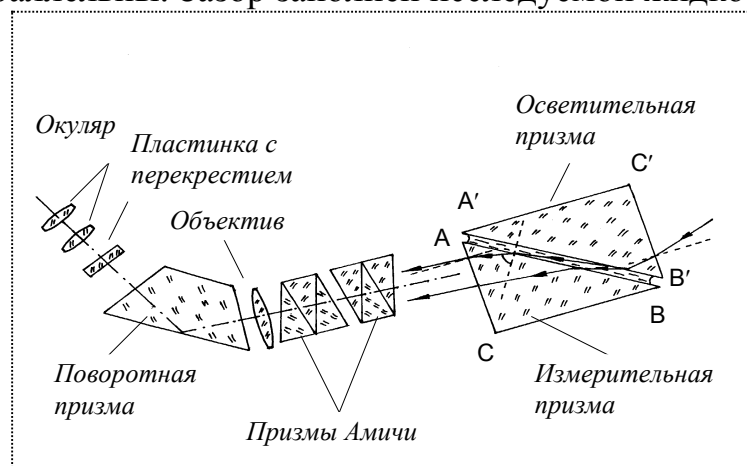


Рисунок 2

Система призм освещается со стороны грани C'B'. Грань A'B' второй призмы сделана матовой, и, рассеиваясь на ней, свет падает на границу жидкость - стекло (грань АВ) под разными углами. Поскольку толщина зазора мала по сравнению с размерами граней, то угол падения практически достигает 90° (угол скольжения). Преломлённые лучи направлены в измерительной призме в пределах от 0 до $\varphi_{\text{пр}}$. Выходящие из грани AC лучи создают в зрительной трубе картину разграниченных верхнего светлого и нижнего затенённого полей. Из-за дисперсии света граница света и тени может быть окрашенной. Для устранения этого и измерения удельной дисперсии исследуемого вещества между призмами и зрительной трубкой установлена система ахроматизирующих дисперсионных призм (Амичи), при повороте которых можно добиться исчезновения радужной окраски границы. После того как достигнута максимально возможная резкость границы раздела светлого и

тёмного поля, поворачивая систему призм вокруг горизонтальной оси, устанавливают границу точно в центре поля зрения (на скрещении волосков в окуляре). Поскольку измерительная головка жестко связана с отсчётным устройством, то наблюдаемое в окуляр показание его шкалы, соответствующее положению призм, даёт значение коэффициента преломления исследуемой жидкости. В свою очередь показания шкалы барабана компенсатора дают информацию об её средней дисперсии.

Для определения коэффициента преломления окрашенных и мутных жидкостей, а так же твёрдых образцов используется метод полного внутреннего отражения, поскольку в этом случае границу раздела целесообразнее освещать со стороны измерительной призмы ABC. Грань СВ сделана матовой, и лучи, рассеиваясь, падают на границу раздела измерительной призмы и исследуемого вещества (грань АВ) под разными углами. При отражении от неё лучи с углами падения большими $\varphi_{\text{пр}}$ имеют большую интенсивность, так как происходит полное внутреннее отражение. В результате в зрительной трубе наблюдается нижнее светлое поле и верхнее поле полутени. Дальнейшая настройка рефрактометра и снятие показаний производится аналогично методу скользящего луча.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять показания термометра (температура в комнате, если не производится термостатирование измерительной головки). По окончании эксперимента повторно снять показания.

2. Откинув верхнюю часть, в которую встроена осветительная призма, измерительной головки рефрактометра, промыть поверхности призм дистиллированной водой и затем осторожно протереть их фильтровальной бумагой.

3. Установив измерительную призму горизонтально, аккуратно нанести пластмассовой палочкой на её поверхность несколько капель дистиллированной воды, затем осторожно закрыть головку. Через окно в верхней части головки (грань С'В') проверить, полностью ли вода заполнила зазор между призмами.

4. Регулировкой зеркала добиться равномерного освещения (через верхнее окошко головки) поля зрения в окуляре. При этом нижнее окошко (грань СВ измерительной призмы) закрыто крышкой!

5. Настроить зрительную трубу на резкое изображение перекрестия волосков в окуляре.

6. Вращая маховик, поворачивающий измерительную головку, и наблюдая в окуляр, найти границу света и тени (для воды граница находится в районе 1,33 показаний шкалы в окуляре). Устранить, поворачивая барабан компенсатора, радужную окраску границы раздела.

7. Точно совместить изображения границы раздела света и тени с перекрестием окуляра. Снять отсчёт по шкале коэффициентов преломления рефрактометра с четырьмя десятичными знаками, оценивая десятитысячные на глаз.

8. Для уменьшения случайной погрешности настройки, несколько раз сместить положение границы и затем выполнить операции по п. 6.

9. Произвести измерения показателей преломления трех водных растворов с известной концентрацией сахара (в порядке их возрастания). При смене образцов осторожно протирать призмы фильтровальной бумагой.

10. Измерить коэффициент преломления раствора с неизвестной концентрацией сахара.

11. Открыть крышку нижнего окошка и осветить зеркалом грань СВ измерительной призмы. Произвести измерение коэффициента преломления жидкости по методу полного внутреннего отражения.

12. Промыть измерительную головку дистиллированной водой и протереть фильтровальной бумагой.

7. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Занести полученные значения коэффициента преломления в табл. 1.

2. Рассчитать средние значения коэффициентов преломления дистиллированной воды и исследованных растворов, а также случайную погрешность измерений методом средних значений. (В случае проведения измерений при температуре отличной от $20 \pm 0,2$ °C сделать поправку δ_n на температуру по формуле

$$\delta_n = (t-20) (\partial n_n / \partial t) \sin \gamma,$$

где t - среднее значение температуры, °C; $(\partial n_n / \partial t)$ - температурный коэффициент показателя преломления стекла измерительной призмы; γ - угол задаваемый конструкцией прибора.

Для используемого рефрактометра ИРФ-22 в интервале температур $5...35$ °C $\partial n_n / \partial t = 0,084 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\gamma = 0,87$ и в результате $\delta_n = 0,073 (t-20) \times 10^{-4}$. Вычислить истинное значение коэффициента преломления

$$n_D^{20} = \langle n \rangle + \delta_n.$$

Т а б л и ц а 1

Номер раствора	Дистиллированная вода	I	II	III	“X”
C_i , вес. %					
n_1					
...					
n_5					
$\langle n \rangle \pm \Delta n$					
n_D^{20}					
α_i					

3. Сравнить полученное значение коэффициента преломления воды с табличным.

4. Построить график зависимости $n(C)$ и по графику определить неизвестную концентрацию образца “X” (обосновать выбор масштаба осей координат графика).

5. Пользуясь формулой (1) рассчитать значение поляризуемости сахарозы в водном растворе для образца III ($C_3 = 15\%$, плотность раствора $\rho_3 = 1,0592 \text{ кг/м}^3$).

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните явление преломления, дисперсии и полного внутреннего отражения света.

2. Расскажите о методах измерения коэффициента преломления жидких и твёрдых образцов.

3. Расскажите о принципиальной оптической схеме, устройстве используемого рефрактометра и методиках измерений коэффициента преломления.

4. Приведите примеры применения явлений преломления, полного внутреннего отражения и дисперсии света в науке и технике.

5. Объясните наблюдаемую зависимость коэффициента преломления от концентрации раствора. Какова на Ваш взгляд будет эта зависимость при дальнейшем увеличении концентрации? Приведите примеры других оптических методов измерения концентрации растворов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 24**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ
СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучение способов определения фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз, построение изображений в них.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Линзы представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая, а вторая сферическая или плоская), преломляющими световые лучи, способные формировать изображения предметов.

Линза называется тонкой, если ее толщина значительно меньше по сравнению с радиусами поверхностей, ограничивающих линзу. Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется главной оптической осью. Для всякой линзы существует точка, называемая оптическим центром линзы, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи, проходя через нее, не преломляются.

Если лучи, параллельные главной оптической оси, после прохождения через линзу, пересекаются, то линза называется собирающей, а точка пересечения лучей называется фокусом линзы. Если лучи, параллельные главной оптической оси после прохождения через линзу расходятся, то линза называется рассеивающей.

Формула тонкой линзы имеет вид

$$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}, \quad (1)$$

где F - фокусное расстояние линзы; d - расстояние от предмета до линзы; f - расстояние от линзы до изображения.

Знаки перед слагаемыми в этой формуле определяются типом линзы (собирающая или рассеивающая) и видом изображения (действительное или мнимое).

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой линзы:

$$\frac{1}{\pm F} = \pm D.$$

Каждая линза при заданном расстоянии от предмета до линзы дает определенное увеличение, под которым понимается отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета:

$$\Gamma = \frac{H}{h}, \quad (2)$$

где H - линейные размеры изображения; h - линейные размеры предмета.

Из геометрических соображений можно показать, что

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|},$$

откуда

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}. \quad (3)$$

Если расстояние между предметом и экраном, на котором находится изображение, больше $4F$, то всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получают отчетливые изображения предмета, одно - уменьшенное, другое - увеличенное. На последнем утверждении и на применении формулы тонкой линзы основаны различные способы определения фокусного расстояния линз.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Оптическая скамья с подставками.
2. Собирающая L_1 и рассеивающая L_2 линзы.
3. Осветитель S .
4. Экран \mathcal{E} .

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

5.1. Способ 1 (метод Аббе)

Расположить приборы согласно схеме (рис. 1). Получить изображение предмета на экране. Измерить расстояние d от предмета AB до линзы L_1 и f от линзы L_1 до изображения $A'B'$. Определить фокусное расстояние F собирающей линзы по формуле (1). Меняя положения линзы и экрана, повторить измерения три раза.

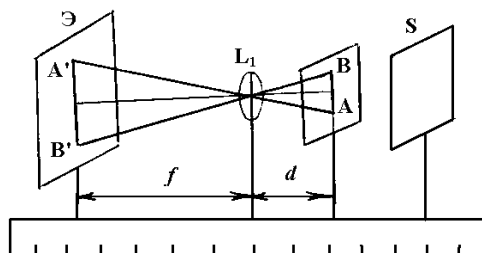


Рисунок 1

Результаты измерений и вычислений поместить в табл. 1 (опыт 1, 2, 3).

Т а б л и ц а 1

	номер опыта	d , м	f , м	AB , м	$A'B'$, м	l , м	L , м	F_i , м	ΔF_i , м	ΔF_i^2 , м ²
Спо- соб 1 (Аббе)	1									
	2									
	3									
Спо- соб 2 (Бес- селя)	4									
	5									
	6									
Спо- соб 3	7									
	8									
	9									
		$\langle F \rangle = \dots\dots\dots$								

5.2. Способ 2 (метод Бесселя)

Расположить приборы по схеме (рис. 1). Замерить расстояние L между предметом и экраном (рис. 2).

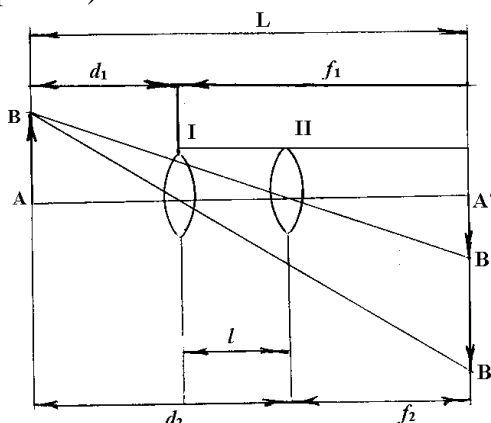


Рисунок 2

Получить, перемещая линзу L_1 , четкое увеличенное изображение предмета на экране и заметить положение линзы I. Передвигая линзу, получить уменьшенное изображение предмета и замерить положение линзы II. Измерить расстояние l между двумя положениями линз I и II. Учитывая, что

$$l = f_1 - f_2 = d_2 - d_1,$$

$$L = d_1 + f_1 = d_2 + f_2$$

и из соображений симметрии

$$d_1 = f_2 \text{ и } d_2 = f_1$$

можно записать

$$d_1 = \frac{1}{2}(L - l), \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{1}{2}(L + l). \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (1), получаем формулу для определения фокусного расстояния линзы

$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L} \quad (6)$$

Измерения повторить 3 раза для разных L и l . Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1 (опыты 4, 5, 6).

5.3. Способ 3

Расположить приборы по схеме (рис. 1). Получить резкое изображение предмета. Измерить величину предмета AB , величину его изображения $A'B'$ и расстояние от изображения $A'B'$ до линзы f . Используя уравнения (1), (2) и (3) получим формулу для определения фокусного расстояния линзы

$$F = \frac{f \cdot AB}{AB + A'B'}. \quad (7)$$

Меняя положение линзы и экрана, измерить величины AB , $A'B'$ и f - 3 раза. Результаты занести в таблицу 1 (опыты 7, 8, 9).

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

Собрать схему, как в случае собирающей линзы (рис. 1). Заметить положение экрана D , когда получается четкое изображение предмета (рис. 3).

Между собирающей линзой и точкой D поместить рассеивающую линзу L_2 , которая отодвигает изображение предмета в точку E . Пользуясь обратимостью хода лучей, можно рассматривать эти лучи света как распространяющиеся из точки E . Тогда точка D будет мнимым изображением точки E после преломления лучей в линзе L_2 . Следовательно, $EC = a_1$, $DC = a_2$. Найти эти расстояния не менее 3 раз.

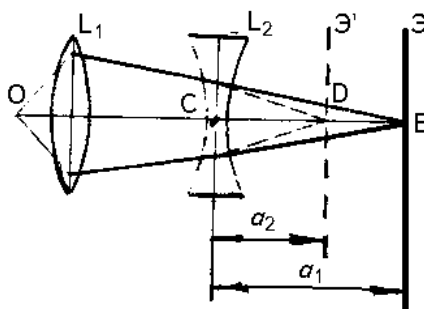


Рисунок 3

Учитывая, что F и a_2 имеют отрицательный знак, формула для определения фокусного расстояния будет иметь вид

$$\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} = -\frac{1}{F}, \text{ или } F = \frac{a_1 a_2}{a_1 - a_2}. \quad (8)$$

Результаты измерений и вычислений поместить в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

№	$d_1, \text{м}$	$a_2, \text{м}$	$F, \text{м}$	$\Delta F_i, \text{м}$	$\Delta F_i^2, \text{м}^2$
1					
2					
3					

$$\langle F \rangle = \dots\dots\dots \sum_{i=1}^n \Delta F_i^2 = \dots\dots\dots$$

7. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

$$1. \text{ Рассчитать среднее значение } \langle F \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{N}.$$

2. Вычислить среднеквадратичную погрешность

$$\Delta S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta F_i^2}{N(N-1)}}.$$

3. Определить коэффициент Стьюдента $t_\alpha(n)$ по таблице для коэффициента надежности заданного преподавателем.

4. Рассчитать величину доверительного интервала $\langle \Delta F \rangle = t_\alpha(n) \cdot \Delta S$ и представить результат в виде

$$F = \langle F \rangle \pm \langle \Delta F \rangle, \quad \varepsilon = \frac{\langle \Delta F \rangle}{\langle F \rangle} \cdot 100\%.$$

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение линзы и оптической системы.
2. Укажите основные характеристики тонкой линзы: оптический центр, главная и побочная оптические оси, фокусы, фокальная плотность.
3. Дайте определение оптической линзы.
4. Опишите ход лучей в линзах и способы построения изображения в линзах и оптических системах.
5. Объясните методы определения фокусного расстояния линз.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 25**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В РАСТВОРАХ
НА УНИВЕРСАЛЬНОМ МОНОХРОМАТОРЕ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Изучение законов поглощения света в жидкостях.
2. Ознакомление с устройством и работой малогабаритного универсального монохроматора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. - М.: Наука, 1986. - 332 с.
3. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: Наука, 1970. — 412 с.

3. КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Свет, проходя через любую среду, поглощается. Поглощение света связано с преобразованием в веществе энергии электромагнитного излучения в другие виды энергии. С точки зрения электронной теории взаимодействие света и вещества сводится к взаимодействию электромагнитного поля световой волны с атомами и молекулами вещества. Электроны, входящие в состав атомов, могут колебаться под действием переменного электрического поля световой волны. Часть энергии световой волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов. Частично энергия колебания вновь переходит в энергию светового излучения, а также переходит и в другие формы энергии, например, в энергию теплового движения. Действительно, поглощение света сопровождается нагреванием тела. Поглощение света можно в общих чертах описать с энергетической точки зрения, не входя в детали механизма взаимодействия световых волн с атомами и молекулами поглощающего вещества.

Пусть через однородное вещество распространяется пучок параллельных монохроматических лучей длиной волны λ . Разобьем слой поглощающего вещества на ряд элементарных слоев толщиной dl (рис. 1).

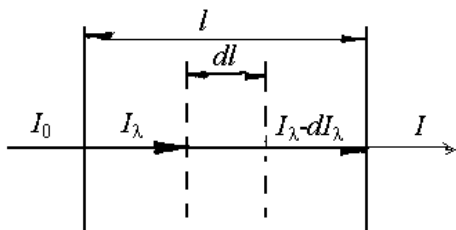


Рисунок 1

При прохождении света сквозь такой слой изменение интенсивности света dI_λ на пути dl пропорционально величине этого пути и интенсивности света

$$-dI_{\lambda} = k_{\lambda} \cdot I_{\lambda} \cdot dl. \quad (1)$$

Коэффициент k_{λ} определяется свойствами поглощающего вещества и называется коэффициентом поглощения. Интегрируя уравнение (1), получаем

$$\ln I - \ln I_0 = -k_{\lambda} l. \quad (2)$$

Из (2) следует закон Бугера

$$I = I_0 e^{-k_{\lambda} l}. \quad (3)$$

Здесь

$$k_{\lambda} = \frac{2.3 \lg I/I_0}{l} = \frac{2.3D}{l} = \frac{2.3 \lg(1/t)}{l},$$

где $D = -\lg(I/I_0)$ - оптическая плотность; $t = I/I_0$ - коэффициент пропускания; I - интенсивность света, вышедшего из поглощающего вещества; I_0 - интенсивность света, вошедшего в слой поглощающего вещества (потери света при отражении от границ поглощающей среды пренебрегаем).

Свет различных длин волн поглощается различно, поэтому коэффициент поглощения k_{λ} зависит от длины волны. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны называется спектром поглощения (рис. 2).

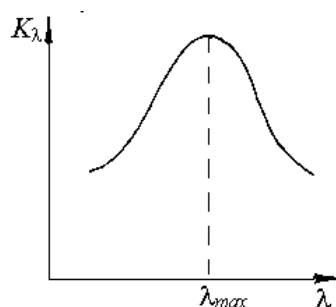


Рисунок 2

Ослабление интенсивности света при его прохождении через вещество может происходить также и за счет его рассеяния. Однако в случае прозрачных сред рассеянием света можно пренебречь. Если поглотителем является растворенное в жидком или твердом растворителе вещество, то поглощение будет тем больше, чем больше молекул растворенного вещества свет встречает на своем пути. Поэтому в случае разбавленных растворов, т.е. когда взаимодействие молекул растворенного вещества мало, коэффициент поглощения пропорционален его концентрации C

$$k_{\lambda} = \chi C,$$

где χ - коэффициент пропорциональности (коэффициент экстинкции), также зависящий от длины волны λ .

Тогда, подставив k_{λ} в формулу (3), получим закон Бугера-Бера

$$I = I_0 e^{-\chi C l}, \quad (4)$$

показывающий изменение интенсивности света при поглощении его в разбавленных растворах.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Малогабаритный универсальный монохроматор (МУМ).
2. Кюветы с раствором.

5. УСТРОЙСТВО И РАБОТА МАЛОГАБАРИТНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО МОНОХРОМАТОРА

Основными узлами МУМ являются (рис. 3):

1. Источник излучения (1), которым является галогенная лампа накаливания типа "КГМ12-100". Световой поток выводится через конденсор, встроенный в стенку кожуха источника. Схемой предусмотрено изменение накала лампы ("Накал-недокал") с помощью тумблера, расположенного в стенке кожуха источника.

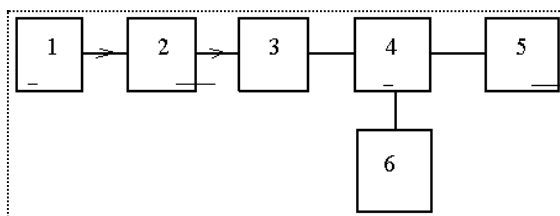


Рисунок 3

2. Предметная стойка, на которой устанавливаются кюветы (разной длины) с растворами.

3. Оптический блок (3) состоит из вогнутой дифракционной решетки, которая выполняет роль фокусирующего и диспергирующего элемента. Свет на нее попадает от источника через конденсор, входную щель и поворотное зеркало. Монохроматический луч, получаемый при прохождении дифрагированного излучения через выходную щель, попадает на приемник. Щели (входная и выходная) сменные, постоянной ширины, одинаковые. Для получения большей спектральной чистоты выделяемого излучения при работе в области спектра 290...710 нм входная и выходная щели устанавливаются в положение I, а при работе в области спектра 200...290 нм и 710...800 нм щели устанавливаются в положение II.

Номинальные размеры смежных щелей и обозначение положения щели нанесены на их поверхности.

Сканирование спектра осуществляется поворотом дифракционной решетки. Отсчет длины волны монохроматического луча, выходящего из оптического блока, осуществляется с помощью цифрового механического счетчика с точностью 0,2 нм.

4. Блок приемника монохроматического излучения (4) состоит из фотоэлемента (Ф-26) и усилителя электрического сигнала. Световой поток, падающий на катод фотоэлемента регулируется с помощью ручки, выведенной на боковую стенку приемника и изменяющий раскрытие диафрагмы. На катод фотоэлемента подается напряжение 45 В от блока питания. Анодная нагрузка фотоэлемента представляет собой набор резисторов, с помощью которых ре-

гулируется чувствительность монохроматора. Это осуществляется переключателем, выведенным на боковую стенку приемника (положения 1...4).

С анодной нагрузки фотоэлемента сигнал подается на вход измерительного усилителя, собранного на электрометрической лампе ЭМ-7, обладающей высоким входным сопротивлением.

5. С выхода усилителя сигнал подается на вход цифрового вольтметра (В7-22), который может быть включен либо как миллиамперметр, либо как непосредственно вольтметр. Регистрация интенсивности излучения осуществляется по шкале цифрового вольтметра в относительных единицах.

6. Питание приемника осуществляется с помощью источника питания (6), на боковую стенку которого выведены тумблеры "Сеть", "Накал-недокал", "Фотоэлемент" и гнезда для подключения вольтметра. В блок питания входят: силовой трансформатор, стабилизатор и преобразователь напряжения. Стабилизатор включает в себя выпрямитель, источник опорного напряжения на стабилитроне, двухкаскадный усилитель. Преобразователь представляет собой автогенератор с индуктивной связью, который питается от стабилизатора.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

а) Подготовка установки к измерениям

1. Подключите блок питания к сети и включите тумблер "Сеть". При этом должна загореться сигнальная лампочка. Тумблер "Накал-недокал" должен находиться в среднем положении (источник света отключен). Включите тумблер "Фотоэлемент".

2. Подключите вольтметр В7-22А к сети. Включите тумблер "Сеть" и прогрейте прибор в течение 15 мин. Подключите вольтметр к блоку питания. Поставьте органы управления в рабочее положение (нажмите кнопки *mA* и 02).

3. После прогрева установки установите нулевое показание вольтметра с помощью ручки "Установка 0" на боковой стенке приемника. Допустимы показания на вольтметре в интервале 0...0,0005.

4. Установите начало диапазона спектра поглощения с помощью ручки "Длина волны" на оптическом блоке (360 нм).

5. Установите переключателем на приемнике чувствительность в положение "I".

б) Проведение измерений и их обработка

1. Установите на предметную стойку (2) кювету с растворителем (светлая жидкость).

2. Включите источник, поставив тумблер на блоке питания в положение "Накал".

3. Установите с помощью ручки "Диафрагма" на приемнике единичное показание на табло вольтметра ($0,100 \pm 0,002$), что будет соответствовать значению I_0 в относительных единицах.

4. Замените кювету на аналогичную с раствором и запишите показание вольтметра, которое соответствует значению I (в относительных единицах), в табл. 1.

5. Увеличьте длину волны на 20 нм и повторите эксперимент, установив $I_0 = 0,100 \pm 0,002$ и измерив I для раствора. Результаты измерений занесите в табл. 1.

6. По результатам измерений рассчитайте величины t , D , k_λ и занесите их в табл. 1.

7. Постройте график зависимости $k_\lambda = f(\lambda)$ и по нему определите λ_{max} , соответствующее максимальному значению k_λ .

Т а б л и ц а 1

λ (нм)	I_0	I	$t = I/I_0$	$D = -\lg I/I_0$	$k_\lambda = \frac{2,3}{l} D$
360					
380					
400					
420					
440					
460					
480					
500					

8. Определите зависимость оптической плотности D от длины кюветы для $\lambda = \lambda_{max}$. Данные занесите в табл. 2. Постройте график зависимости $D = f(l)$.

9. Подтвердите прямую пропорциональность коэффициента поглощения от концентрации, зная, что $C_1 = 4C_2$. Для этого при λ_{max} определите $k_1 = f(C_1)$ и $k_2 = f(C_2)$ и найдите их отношение.

10. Зная концентрацию раствора, определите коэффициент экстинкции по формуле $\chi = \frac{k_\lambda}{C_1}$ при $\lambda = \lambda_{max}$.

Т а б л и ц а 2

l , см	I_0	I	$D = -\lg \frac{I}{I_0}$
1	0,100		
2	0,100		
3	0,100		
4	0,100		
5	0,100		

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы Бугера и Бугера - Бера.
2. Объясните механизм взаимодействия света с веществом.
3. Что определяет оптическая плотность и коэффициент пропускания?
4. Как связан коэффициент поглощения с оптической плотностью? Каков физический смысл коэффициента поглощения?
5. Объясните метод определения коэффициента поглощения, используемый в данной работе.
6. Какие другие методы определения коэффициента поглощения используются на практике?
7. Объясните принцип работы универсального монохроматора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 26

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение явления поглощения света веществом и определение коэффициента поглощения с помощью визуально-фотоэлектрического фотометра.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.
3. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: Высш. шк., 1970. - 448 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Поглощением (абсорбцией) света называется явление потери энергии световой волны при прохождении ее через вещество. Энергия света возбуждает колебания электронов, излучающих затем вторичные волны, а частично переходит во внутреннюю энергию, в результате чего вещество нагревается.

Пусть монохроматический свет с интенсивностью I_0 и длиной волны λ падает параллельным пучком нормально к поверхности поглощающего тела (рис. 1). Уменьшение интенсивности света при прохождении слоя вещества толщиной dl пропорционально интенсивности света, падающего на этот слой, и толщине слоя

$$-dI_\lambda = k_\lambda I_\lambda dl. \quad (1)$$

Коэффициент k_λ зависит от свойств поглощающего вещества и длины волны света и не зависит от интенсивности света и толщины поглощающего слоя. Проинтегрируем уравнение (1), предварительно разделив переменные:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = -k_\lambda \int_0^l dl, \quad \ln I - \ln I_0 = -k_\lambda l,$$

откуда

$$I = I_0 e^{-k_\lambda l}. \quad (2)$$

Эта формула носит название закона Бугера. Из закона Бугера видно, что численно коэффициент поглощения – величина обратная толщине слоя вещества, при прохождении которого интенсивность света уменьшается в e раз.

Зависимость $k_\lambda(\lambda)$ называется спектром поглощения (рис. 2). У прозрачных тел полосы поглощения лежат, в основном, в области инфракрасных и ультрафиолетовых участков спектра, а у окрашенных – в соответствующих участках видимой области спектра. Например, красным является стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи и хорошо поглощающее зеленые, синие и фиолетовые.

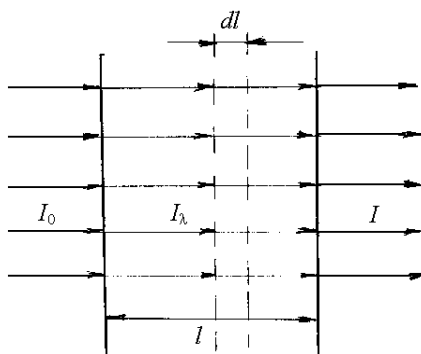


Рисунок 1

Одноатомные газы и пары металлов, в которых атомы расположены на значительных расстояниях друг от друга, имеют максимумы поглощения для очень узких спектральных областей ($10^{-12} \dots 10^{-11}$ м), соответствующих частотам собственных колебаний электронов в атомах, т.е. у них линейчатый спектр поглощения. Спектр поглощения отдельных молекул, определяемый еще и колебаниями атомов в молекулах, характеризуется полосами поглощения (примерно $10^{-10} \dots 10^{-7}$ м).

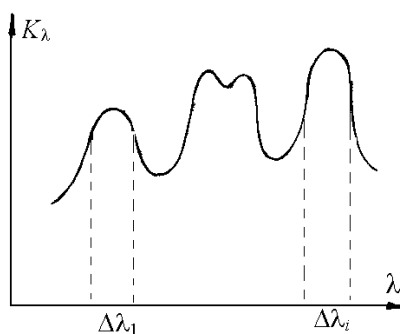


Рисунок 2

Металлы имеют большой коэффициент поглощения ($10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-1}$) и непрозрачны для света. Это обусловлено наличием большого количества свободных электронов, движущихся под действием электрического поля световой волны, т.е. возникают быстропеременные токи, сопровождающиеся выделением джоулевой теплоты. Поэтому энергия световой волны быстро уменьшается, превращаясь во внутреннюю энергию. Чем выше проводимость металла, тем сильнее в нем поглощение света.

Коэффициент поглощения для диэлектриков невелик ($10^{-1} \dots 10^{-3} \text{ м}^{-1}$). Диэлектрики имеют сравнительно широкие полосы поглощения, т.е. сплошной спектр поглощения, однако, в определенных интервалах длин волн наблюдается селективное поглощение и k_{λ} резко возрастает. Это связано с тем, что в диэлектриках почти нет свободных электронов и поглощение света обусловлено явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомов в молекулах диэлектрика.

Зависимостью коэффициента поглощения от длины волны объясняется и окрашенность поглощающих тел. Идеально белым называется такое тело, у которого коэффициент отражения равен 1, поэтому коэффициент отражения

r (это отношение интенсивности отраженного света к интенсивности падающего) характеризует степень белизны, а коэффициент поглощения - степень черноты тела.

Отношение интенсивности прошедшего через вещество света к интенсивности падающего называется коэффициентом пропускания:

$$t = \frac{I}{I_0} = e^{-k_\lambda l}.$$

Если тело непрозрачно, то $t = 0$ и $r + k_\lambda = 1$. Величина $D = \lg \frac{1}{t}$ называется оптической плотностью данной среды. Оптическая плотность, равная 1, соответствует 10 % пропускания света, равная 2 - 1% и т.д.

$$\text{Из } \ln \frac{I_0}{I} = k_\lambda l \text{ и } D = \lg \frac{I_0}{I} \text{ имеем } 2,3D = k_\lambda l \text{ или } k_\lambda = \frac{2,3}{l}.$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Визуально-фотоэлектрический фотометр ФМ-58.
2. Лабораторный стенд.
3. Исследуемые образцы.
4. Блок питания.

5. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

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

Оптическая схема визуально - фотоэлектрического фотометра ФМ - 58 изображена на рис. 3. Свет от лампы накаливания 1 отражается от зеркал 2, проходит через конденсоры 3 и молочные или матовые рассеиватели 4 и, выходя из осветителя двумя параллельными пучками I и II, попадает в прибор через диафрагмы 5, степень раскрытия которых регулируется барабанами 6. Отсчет по шкалам измерительных барабанов производится с помощью индексов. Для удобства шкалы барабанов освещаются и над ними помещены лупы. Затем пучки лучей проходят через объективы 7 и ромбические призмы 8, после чего попадают на бипризму 11. Действие бипризмы заключается в том, что она сводит два пучка к оси окуляра, причем часть правого пучка, попадая на левую половину бипризмы, создает яркость левой половины поля зрения, а другая часть, попадающая на правую половину бипризмы, отклоняется в сторону и поглощается внутри прибора. Левый пучок проходит аналогично. Между ромбическими призмами и бипризмой расположен диск с одиннадцатью светофильтрами.

При выходе из окуляра 15 световые пучки попадают в глаз наблюдателя. Окуляр снабжен кольцом, с помощью которого производится установка на резкость линии раздела поля зрения. На корпус окуляра надет эбонитовый наглазник, для удобства имеется и второй глухой наглазник, который может закрыть неработающий глаз.

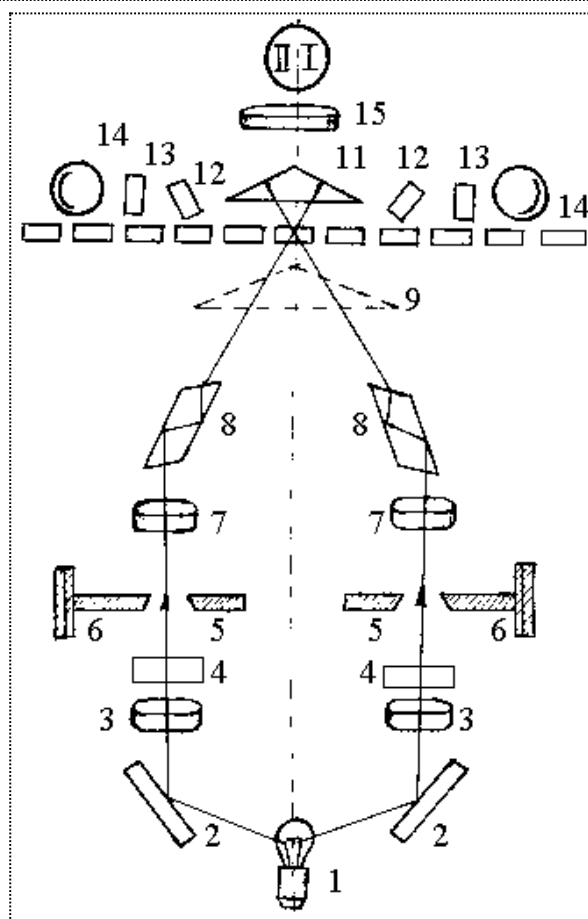


Рисунок 3

При фотоэлектрическом методе измерений в оптическую схему с помощью рукоятки, которую нужно оттянуть на себя, а затем поставить в верхнее положение, вводится призма - клин 9. В этом случае пучки света, отразившись от зеркал 12 и пройдя матовые стекла 13, падают на фотоэлементы 14, подключенные по дифференциальной схеме, в результате чего на сетки усиленной лампы подается напряжение разности фототоков. Нулевым индикатором является гальванометр. Стрелка гальванометра стоит на нуле в том случае, когда фототоки равны и, следовательно, равны потоки света, падающие на фотоэлементы.

Когда диафрагмы одинаково раскрыты и освещены, яркость обеих половин поля зрения одинакова. Если на пути одного из пучков света поместить поглощающее вещество, то фотометрическое равновесие нарушится. Для его восстановления нужно уменьшить диафрагму, через которую проходит второй пучок света. На измерительных барабанах нанесены две шкалы - черная и красная. Черная показывает в процентах отношение площади отверстия диафрагмы при данном ее раскрытии к площади при ее максимальном раскрытии. Т.к. световой поток равномерного пучка света, проходящего через диафрагму, пропорционален площади ее раскрытия, то отношение площадей отверстий диафрагмы дает отношение световых потоков. Следовательно, показания черной шкалы барабана дают непосредственно коэффициент пропускания (или отражения r) для данного образца в процентах. По красной шкале определяют оптическую плотность образца.

Фотометры предназначены для измерения коэффициентов пропускания твердых и жидких прозрачных сред, коэффициентов яркости света рассеивающих образцов и их блеска. Их применяют в оптической и текстильной промышленности, бумажном и кожевенном производстве. В химических клинических лабораториях с их помощью производят количественные анализы различных веществ колориметрическим методом.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определение коэффициента поглощения прозрачного образца

1. Включить установку.
2. Включить через трансформатор лампу осветителя и освещения шкал.
3. Установить переключатель светофильтров в положение 12 (свободное отверстие).

4. Правый барабан установить на деление 100 по черной шкале, а левым барабаном уравнивать обе половины поля зрения по яркости. Повторить это пять раз и вычислить среднее значение показаний левого барабана при фотометрическом равновесии. Установить на барабане это значение.

5. Исследуемый образец поместить на предметный столик под левой диафрагмой, при этом правая половина поля зрения потемнеет. Вращая правый барабан, добиться фотометрического равновесия и снять отсчет D_i по красной шкале правого барабана. Прodelать это пять раз и найти среднее арифметическое значение $\langle D \rangle$.

6. По формуле $k = \frac{2,3}{d} \langle D \rangle$ вычислить коэффициент поглощения исследуемого образца (d - толщина образца).

7. Определить абсолютные погрешности оптической плотности $\Delta D_i = \langle D \rangle - D_i$ и среднюю абсолютную погрешность

$$\langle \Delta D \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta D_i|}{n}.$$

8. По формуле

$$\Delta k = \frac{\partial k}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial k}{\partial d} \Delta d = \frac{2,3}{d} \langle \Delta D \rangle + \frac{2,3 \langle D \rangle}{d^2} \Delta d$$

найти абсолютную погрешность коэффициента поглощения и относительную погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta k}{k} \cdot 100\%$. Окончательный результат записать в виде $k \pm \Delta k$.

9. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

$d, \text{ м}$	$\Delta d, \text{ м}$	D_i	$\langle D \rangle$	ΔD_i	$\langle \Delta D \rangle$	$k, \text{ м}^{-1}$	$\Delta k, \text{ м}^{-1}$	$\varepsilon, \%$

10. Повторить действия пунктов 5, 6 со светофильтрами № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11 и заполнить табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Номер филь-тра	$\lambda \cdot 10^{-7}, \text{ м}$	D_1	D_2	D_3	$\langle D \rangle$	$k_\lambda, \text{ м}^{-1}$
1	4					
2	4,43					
3	4,9					
4	5,4					
5	5,82					
6	6,1					
10	6,65					
11	7,26					

11. По данным табл. 2 построить график зависимости коэффициента поглощения от длины световой волны $k_\lambda = f(\lambda)$.

II. Изучение зависимости оптической плотности от толщины поглощающего слоя

1. Измерить толщину образцов, изготовленных из одного и того же вещества.
2. Определить оптическую плотность этих образцов.
3. Проверить зависимость $D = A d$ ($A = k / 2,3$), т.е. $A = D / d = \text{const.}$
4. Сделать вывод о том, как зависит оптическая плотность от толщины поглощающего слоя.

Т а б л и ц а 3

Номер образца	$d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$d_3, \text{ м}$	$\langle d \rangle$	D_1	D_2	D_3	$\langle D \rangle$	$\frac{\langle D \rangle}{\langle d \rangle}$

III. Изучение зависимости коэффициента пропускания от толщины поглощающего слоя

1. Для всех образцов различной толщины, но из одного вещества, определить по черной шкале коэффициенты пропускания t . Значения толщины образцов взять из предыдущего опыта.
2. Графически изобразить зависимость коэффициента пропускания от толщины поглощающего слоя.

Т а б л и ц а 4

Номер образца	d , м	t_1 , %	t_2 , %	t_3 , %	$\langle t \rangle$, %

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните механизм взаимодействия света с веществом.
2. Получите закон Бугера.
3. Что называется коэффициентом поглощения, пропускания, оптической плотностью вещества?
4. От чего зависит коэффициент поглощения?
5. Чем объясняется различная окрашенность тел?
6. Начертите оптическую схему фотометра и объясните принцип его действия.
7. Для каких целей применяется фотометр?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 27**ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА.
ЗАКОН МАЛЮСА****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Определение интенсивности света по углу относительного поворота двух поляризаторов.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.2. - М.: Наука, 1988. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Явление поляризации света характеризуется определенной ориентацией магнитного и электрического векторов световой волны в пространстве. Векторы напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости v распространения волны (перпендикулярно лучу). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение одного из векторов.

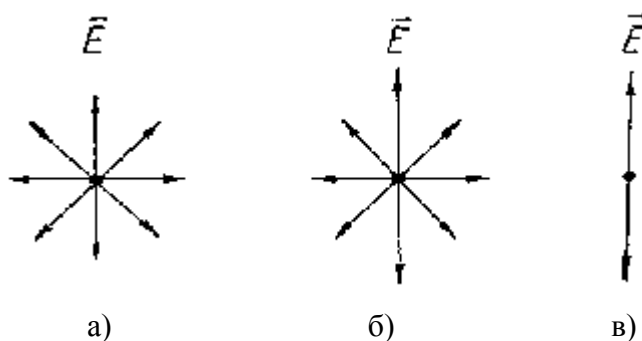


Рисунок 1

Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора – вектора напряженности \vec{E} электрического поля (это название обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества). Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы же излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора (рис. 1, а; луч перпендикулярен плоскости рисунка). В данном случае равномерное распределение векторов \vec{E} объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов \vec{E} – одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого из атомов. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \vec{E} (и следовательно, \vec{E}) называется естественным.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется поляризованным. Так, если в результате ка-

ких-либо внешних воздействий появляется преимущественное направление колебаний вектора \vec{E} (рис. 1, б), то имеем дело с частично поляризованным светом. Свет, в котором вектор \vec{E} (и следовательно, \vec{H}) колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (рис. 1, в), называется плоскополяризованным (линейно поляризованным).

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны, называется плоскостью поляризации. Плоскополяризованный свет является предельным случаем эллиптически поляризованного света – света, для которого вектор \vec{E} (вектор \vec{H}) изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной лучу. Если эллипс поляризации вырождается в прямую (при разности фаз φ , равной нулю или π), то имеем дело с рассмотренным выше плоскополяризованным светом, если в окружность (при $\varphi = \pm \pi/2$ и равенстве амплитуд складываемых волн), то имеем дело с циркулярно поляризованным (поляризованным по кругу) светом.

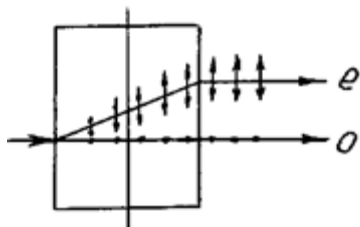


Рисунок 2

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые поляризаторы, пропускающие колебания только определенного направления (например, пропускающие колебания, параллельные плоскости поляризации, и полностью задерживающие колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора \vec{E} , например, кристаллы. В частности, плоскополяризованный свет можно получить за счет явления дихроизма, т.е. различного поглощения света в зависимости от ориентации электрического вектора световой волны (примером сильно дихроичного кристалла является турмалин). Большинство кристаллов, не обладающих кубической симметрией, при пропускании через них света, разделяют световой пучок на два луча, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2). Это явление получило название явления двойного лучепреломления. Один пучок, который подчиняется законам преломления света, называется обыкновенным (о), другой, пространственно смещенный по отношению к первому, который в общем случае не подчиняется классическим законам преломления, называется необыкновенным (е).

Направление в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления, называется оптической осью кристалла. Любая плоскость, проходящая через оптиче-

скую ось и световой луч, называется главным сечением или главной плоскостью кристалла. Колебания, перпендикулярные главному сечению обозначены точками, а колебания, параллельные главной плоскости кристалла изображены двусторонними стрелками.

Типичным представителем поляризационных приборов является призма Николя, называемая часто николем. Призма Николя (рис. 3) представляет собой двойную призму из исландского шпата, склеенную вдоль линии AB специальным клеем – канадским бальзамом с показателем преломления n .

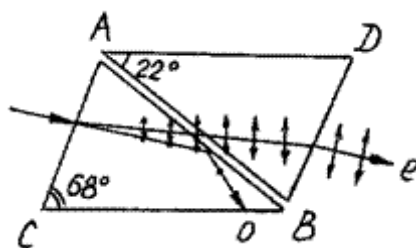


Рисунок 3

Обыкновенный луч (o) на границе AB испытывает полное внутреннее отражение и поглощается зачерненной боковой поверхностью CB . Необыкновенный плоскополяризованный луч (e) выходит, несколько сместившись, параллельно падающему лучу ($n_e < n < n_o$).

Поляризаторы пропускают колебания, параллельные плоскости пропускания поляризатора, и полностью задерживают колебания, перпендикулярные к ней.

Если на поляризатор падает плоскополяризованный свет амплитуды E_0 , то через него пройдет составляющая колебания с амплитудой $E = E_0 \cos \varphi$, где φ - угол между плоскостью поляризации и плоскостью пропускания поляризатора. Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim E^2$), то интенсивность света, прошедшего через поляризатор, равна

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (1)$$

Это соотношение называется законом Малюса. Следовательно, интенсивность прошедшего через пластинки света изменяется от минимума (полное гашение света) при $\varphi = \pi/2$ (оптические оси пластинок перпендикулярны) до максимума при $\varphi = 0$ (оптические оси пластинок параллельны).

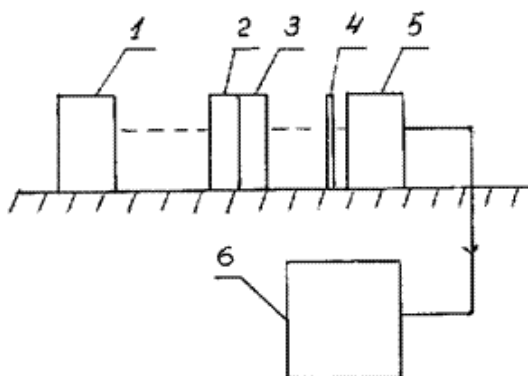


Рисунок 4

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Лазерный излучатель.
2. Первый поляризатор.
3. Второй поляризатор.
4. Экран.
5. Фотоэлемент.
6. Измерительный прибор.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему, изображенную на рис. 4. Установить лазерный излучатель 1.
2. Белые точки, нанесенные на оправках первого и второго поляризаторов установить напротив нулевого деления шкалы.
3. Включить лазер и откорректировать его положение так, чтобы его луч попадал в отверстие фотоэлемента 5, а прибор 6 показывал максимальное значение измеряемого фототока.
4. Установить на измерительном устройстве 5 белый экран и вращая одновременно первый и второй поляризаторы (2 и 3) убедиться в том, что яркость лазерного луча на экране изменяется. Сделать вывод о степени поляризации лазерного излучения.
5. Снять экран, установить оба поляризатора в исходное положение (см. пункт 2) и убедиться в том, что лазерный луч достигает фотоэлемента. При этом показание измерительного прибора должно быть максимально.
6. Занести максимальное значение фототока в таблицу 1 в столбец с $\varphi = 0^\circ$.

Т а б л и ц а 1

φ , град	0	10	20	...	180
I , μA					

7. Изменяя угол поворота первого поляризатора на $\Delta\varphi = 10^\circ$, в диапазоне от 0° до 180° , занести соответствующие показания в табл. 1.
8. Используя результаты табл. 1, построить график $I = f(\cos^2 \varphi)$ изменения фототока от косинуса квадрата угла поворота поляризатора.
7. Сделать выводы о соответствии полученных результатов закону Малюса.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется поляризованным?
2. Опишите способы получения поляризованного света.
3. Сформулируйте закон Малюса.
4. Интенсивность естественного света, пропущенного через два поляризатора, уменьшилась вдвое. Как ориентированы поляризаторы?
5. Что представляют собой поляризаторы и анализаторы?
6. Как практически можно отличить плоскополяризованный свет от естественного?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 28

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение явления интерференции и определение длины волны монохроматического света с помощью колец Ньютона.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: Высш. шк., 1971. - 448 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Схема наблюдения так называемых *колец Ньютона* изображена на рис. 1. Плосковыпуклая линза очень большого радиуса (10...100 м) прижимается выпуклой стороной к плоской пластинке так, что между ними образуется воздушный клин переменной толщины d . Толщина d зависит от расположения точки В и характеризуется радиусом r . Из прямоугольного треугольника ОАМ имеем:

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2 \approx 2Rd,$$

или $d \approx \frac{r^2}{2R}.$ (1)

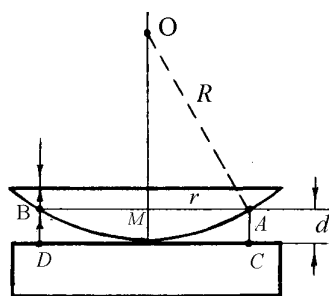


Рисунок 1

Пучок параллельных лучей падает сверху на линзу. Луч, доходящий до точки В, частично отражается, частично проходит в воздушный клин (практически вертикально вследствие малой кривизны линзы). Отражаясь в точке D от пластинки, он возвращается обратно и интерферирует с лучом, отраженным в точке В. Так как в точке D происходит отражение от оптически более плотной среды и теряется полволны, то оптическая разность хода обоих интерферирующих отраженных лучей будет равен:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

При освещении системы монохроматическими лучами в отраженном свете будут наблюдаться перемежающиеся светлые и темные кольца постоянных радиусов r_k . Радиусы темных колец определяются из условия гашения интерферирующих лучей

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (3)$$

или с учетом (2)

$$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda + \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

откуда радиус k -го темного кольца

$$r_k = \sqrt{k\lambda R}. \quad (5)$$

Радиусы последовательных светлых колец находятся из условия интерференционного максимума

$$\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}, \quad (k = 1, 2, \dots), \quad (6)$$

т.е.

$$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

откуда получаем выражение для радиусов светлых колец

$$r_k = \sqrt{(2k-1)R\frac{\lambda}{2}}. \quad (8)$$

Счет темных колец начинается с $k = 0$, т.е. от самого центра интерференционной картины. Счет светлых колец начинается с $k = 1$. Радиусы колец растут пропорционально корню квадратному из их номера k , т.е. чем дальше от центра, тем эти кольца располагаются гуще.

При освещении прибора белым светом светлые кольца становятся соответственно окрашенными.

Измерив радиусы колец r_k , можно (зная радиус кривизны линзы R), определить длину волны освещавшего прибор света λ и обратно, по известной длине волны λ найти радиус кривизны линзы R .

Вследствие упругой деформации стекла, невозможно добиться идеального соприкосновения сферической поверхности линзы и плоской пластины в одной точке, поэтому наиболее правильный результат получится, если вычислить λ по разности радиусов двух колец r_k и r_l :

$$r_k^2 - r_l^2 = (k-l)R\lambda, \quad (9)$$

откуда

$$\lambda = \frac{(r_k - r_l)(r_k + r_l)}{R(k-l)}, \quad (10)$$

где k и l - порядковые номера соответствующих колец.

Учитываем поправку на увеличение, которое дает проектирующая линза

$$\frac{r'}{r} = \frac{a_2}{a_1} = N, \text{ или } r = \frac{a_1}{a_2} \cdot r',$$

где r' - радиус кольца на экране; r - истинный радиус кольца; a_2 - расстояние от экрана до проектирующей линзы; a_1 - расстояние от предмета до проектирующей линзы.

Расчетная формула окончательно имеет вид

$$\lambda = \frac{(r'_k - r'_l)(r'_k + r'_l)}{R(k - l)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2. \quad (11)$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Оптическая скамья.
2. Источник света.
3. Светофильтры.
4. Устройство для получения колец Ньютона.
5. Линза.
6. Экран с миллиметровой координатной сеткой.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Расположить приборы по схеме (рис. 2), включить установку в сеть (220 В), получить на экране четкое изображение колец Ньютона для белого света.

2. Поместить у окна источника света красный светофильтр. На экране закрепить белый лист бумаги, на котором зарисовать интерференционную картину светлых и темных колец Ньютона.

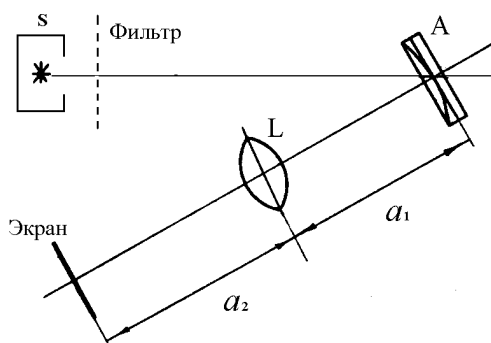


Рисунок 2

3. Поменять красный светофильтр на зеленый и зарисовать интерференционную картину светлых и темных колец Ньютона для зеленого цвета.

4. На полученных интерференционных картинах измерить радиусы трех темных колец $r'_{кр}$ для красного света и трех темных колец $r'_{зел}$ для зеленого цвета. Для уменьшения погрешности измерений каждый радиус получить как среднее значение измерений 3...4 различных диаметров соответствующего кольца.

5. Измерить расстояние a_1 от предмета до проектирующей линзы и a_2 от проектирующей линзы до экрана.

6. Результаты измерений и расчетов поместить в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Номера колец	a_1 , м	a_2 , м	$r'_{кр}$, м	$r'_{зел}$, м
1				
2				
3				

7. Считая длину волны красного цвета равной $\lambda_{кр}=7 \cdot 10^{-7}$ м, вычислить радиус кривизны линзы для трех пар значений $r'_{кр}$ по формулам:

$$R_1 = \frac{(r'_2)^2 - (r'_1)^2}{\lambda_{кр} \cdot (2-1)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2; \quad R_2 = \frac{(r'_3)^2 - (r'_2)^2}{\lambda_{кр} \cdot (3-2)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2;$$

$$R_3 = \frac{(r'_3)^2 - (r'_1)^2}{\lambda_{кр} \cdot (3-1)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2.$$

8. Вычислить среднее значение радиуса кривизны линзы $\langle R \rangle$ и оценить погрешность ΔR методом средних значений.

9. Рассчитать длину световых волн зеленого цвета для трех пар значений $r'_{зел}$, используя среднее значение радиуса линзы $\langle R \rangle$ по формулам:

$$\lambda_1 = \frac{(r'_2)^2 - (r'_1)^2}{\langle R \rangle \cdot (2-1)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2; \quad \lambda_2 = \frac{(r'_3)^2 - (r'_2)^2}{\langle R \rangle \cdot (3-2)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2;$$

$$\lambda_3 = \frac{(r'_3)^2 - (r'_1)^2}{\langle R \rangle \cdot (3-1)} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2.$$

10. Вычислить среднее значение $\langle \lambda_{зел} \rangle$ и оценить погрешность измерения $\Delta \lambda_{зел}$ методом средних значений.

11. Результаты расчетов занести в табл. 2.

12. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2

Номера колец	R , м	ΔR , м	$(\langle R \rangle \pm \Delta R)$, м	$\lambda_{зел}$, м	$\Delta \lambda_{зел}$, м	$(\langle \lambda \rangle \pm \Delta \lambda)$, м
2-1						
3-2						
3-1						

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое интерференция волн, интерференция света? Приведите примеры наблюдения и применения явления интерференции света.
2. Дайте понятие пространственной и временной когерентности.
3. Охарактеризуйте основные способы получения когерентных волн.
4. Объясните возникновение колец Ньютона. Нарисуйте ход световых лучей при наблюдении колец Ньютона в отраженном и проходящем свете.
5. Получите выражения для оптической разности хода лучей в отраженном и проходящем свете.
6. Выведите формулы радиусов светлых и темных колец Ньютона в отраженном и проходящем свете.
7. Выведите расчетную формулу для определения длины световой волны с помощью колец Ньютона.
8. Перечислите преимущества и недостатки метода определения длины световой волны, используемого в данной работе.
9. Какие другие методы измерения длины световой волны вы знаете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 29

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение явления дифракции света на дифракционной решетке. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа одинаковых щелей, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние (щель прозрачна для света) (рис. 1).

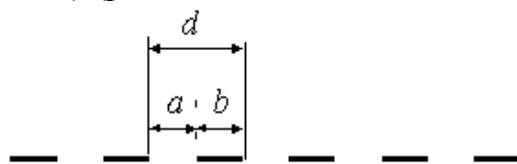


Рисунок 1

Период решетки d (постоянная решетки) равен сумме размеров щели a и размеров полосы b , непрозрачной для света

$$d = a + b.$$

Осветим дифракционную решетку D монохроматическим пучком параллельных лучей, падающих перпендикулярно к поверхности решетки (рис. 2).

Рассмотрим соответственные лучи 1, 2, 3,..., отстоящие друг от друга на расстоянии, равном периоду дифракционной решетки d . Свет, проходя через щели a , испытывает дифракцию, т.е. отклоняется от своего первоначального направления. При этом отклонение лучей происходит под разными углами дифракции φ .

Установим параллельно дифракционной решетке собирающую линзу L , в фокальной плоскости которой поместим экран \mathcal{E} . Из рисунка 2 видно, что оптическая разность хода δ между соответственными лучами равна отрезку AC . Из треугольника ABC видно, что $\delta = AC = d \sin \varphi$. Если в оптической разности хода укладывается целое число длин волн ($\delta = m\lambda$; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$), то при данном угле дифракции на экране наблюдается образование светлых полос, т.е. возникают главные максимумы. Таким образом, условие образования главных максимумов для дифракционной решетки имеет вид

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda. \quad (1)$$

Дифракционная решетка состоит из совокупности щелей a , поэтому условия образования минимумов для щелей будут являться условиями образования минимумов и для дифракционной решетки. Таким образом, минимумы (темные полосы на экране) при дифракции от щели возникают при условии

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (2)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

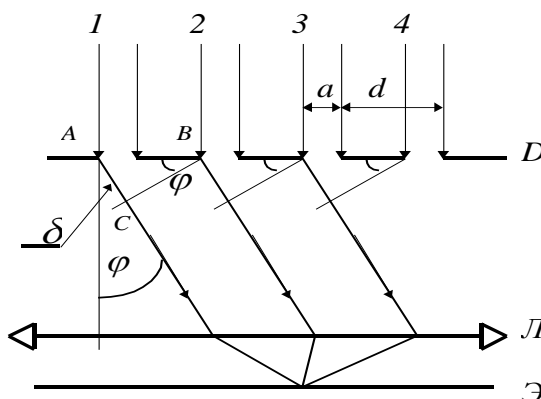


Рисунок 2

Если N - число щелей в дифракционной решетке, то между соседними главными максимумами на экране образуются $N-1$ побочных минимумов и $N-2$ побочных максимумов. При этом условие образования побочных минимумов имеет вид

$$d \sin \varphi = \pm \frac{k'}{N} \lambda, \quad (3)$$

где $k' = 1, 2, 3, \dots, (N-1), (N+1), \dots, (2N-1), (2N+1), \dots$

Основными характеристиками дифракционной решетки являются:

- 1) угловая дисперсия $D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}$;
- 2) линейная дисперсия $D_{\text{лин}} = \frac{a}{\partial \lambda}$.

Дисперсия определяет угловое или линейное расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися на единицу длины волны.

Разрешающая сила определяет минимальную разность длин волн $\partial \lambda$, при которой две линии воспринимаются на спектре раздельно в соответствии с критерием Рэля. Разрешающая сила R спектрального прибора пропорциональна порядку спектра m и числу щелей N :

$$R = mN.$$

Метод определения длины световой волны при помощи дифракционной решетки состоит в следующем. Параллельный пучок света, создаваемый источником света L (лампой накаливания) падает на дифракционную решетку D (рис. 3). Лучи света, дифрагируя под различными углами φ , попадают в хрусталик глаза наблюдателя и собираются на сетчатой оболочке глаза в точке K . Если при этом выполняется условие (1), то исследователь наблюдает

главный максимум под углом φ , т.е. в точке M , отстоящей от центра диафрагмы экрана в точке O на расстоянии l .

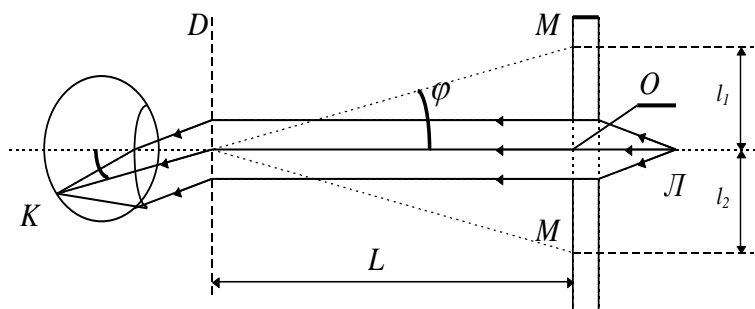


Рисунок 3

Очевидно, что спектр m -го порядка, наблюдаемый через дифракционную решетку, находится на расстоянии l_{cp} от центра шкалы (т.е. от точки O). При этом

$$l_{-p} = \frac{l_1 + l_2}{2}, \quad (4)$$

где l_1 и l_2 - расстояния от главных максимумов $\pm m$ -го порядка до центра шкалы (точка O).

Из рис. 3 видно, что при малых углах φ , под которыми наблюдаются главные максимумы, выполняется соотношение

$$\sin \varphi \cong \tan \varphi = \frac{l_{cp}}{L}, \quad (5)$$

где L - расстояние от дифракционной решетки до шкалы. Подставляя значение $\sin \varphi$ из уравнения (5) в выражение (1), получаем

$$d = \frac{l_{cp}}{L} = m\lambda,$$

откуда определяем длину волны λ

$$\lambda = \frac{l_{cp} d}{Lm}. \quad (6)$$

С учетом выражения (4) соотношение (6) для определения длины световой волны будет иметь вид

$$\lambda = \frac{(l_1 + l_2) d}{2Lm}. \quad (7)$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Оптическая скамья.
2. Источник света и светофильтры.
3. Дифракционная решетка.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Расположить прибор так, чтобы горизонтально расположенная рейка-шкала ММ была на уровне глаз наблюдателя. Установить эту шкалу на рас-

стоянии L , равном 40...50 см от держателя дифракционной решетки (расстояние L устанавливается максимально возможным для соблюдения условия (5) и увеличения точности измеряемых длин волн).

2. Вставить дифракционную решетку D в держатель (период дифракционной решетки равен $d = 0,01$ мм). При этом штрихи, нанесенные на дифракционной решетке, должны быть параллельны прямоугольной диафрагме экрана MM .

3. Установить за экраном электрическую лампочку в точке L , включить электрическое питание и, рассматривая источник света через дифракционную решетку, наблюдать дифракционный спектр. Обратит внимание на характер спектра, расположение лучей различной цветности в спектрах первого ($m = 1$), второго ($m = 2$) и более высоких порядков.

4. Измерить расстояния l_1 и l_2 от центра шкалы (от точки 0) до главных максимумов лучей заданной цветности (например, фиолетовых и красных лучей или любых других по заданию преподавателя) в спектрах первого ($m = 1$) и второго порядков ($m = 2$).

5. Результаты измерений занести в табл. 1.

6. Уменьшить расстояние L на 1...5 см и повторить измерения для лучей заданной цветности в соответствии с пунктами 3...5.

Т а б л и ц а 1

Цвет линии спектра (красный, фиолетовый и т.д.) -							
№	Расстояние, L , м	Порядок, m	l_1 , м	l_2 , м	l_{cp} , м	Длина волны, λ , м	Средняя длина волны $\langle \lambda \rangle$, м
1	$L_1 =$	$m = 1$				$\lambda_1 =$	
2	$L_1 =$	$m = 2$				$\lambda_2 =$	
3	$L_2 =$	$m = 1$				$\lambda_3 =$	
4	$L_2 =$	$m = 2$				$\lambda_4 =$	
5							

6. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитайте длину световой волны заданной цветности для каждого измерения при различных значениях L и m по формуле (7)

$$\lambda = \frac{(l_1 + l_2)d}{2Lm}.$$

Результаты расчета занесите в табл. 1.

2. Вычислите среднее значение длины волны заданной цветности $\langle \lambda \rangle$.

3. Вычислите абсолютные погрешности отдельных измерений по формуле

$$\Delta \lambda_i = | \langle \lambda \rangle - \lambda_i |.$$

4. Вычислите квадраты абсолютных погрешностей отдельных измерений.

5. Рассчитайте среднюю квадратичную погрешность по формуле

$$\Delta S_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \lambda_i)^2}{N(N-1)}}.$$

6. Задайте значение надежности α (в соответствии с указанием преподавателя или примите по умолчанию $\alpha = 0,95$).

7. Определите по таблицам коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(N)$ для заданной надежности α и данного числа измерений N .

8. Вычислите границы доверительного интервала (среднюю абсолютную погрешность)

$$\langle \Delta \lambda \rangle = t_{\alpha}(N) \Delta S_{\lambda}.$$

9. Рассчитайте среднюю относительную погрешность

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta \lambda \rangle}{\langle \lambda \rangle} 100\%.$$

10. Окончательный результат для лучей различной цветности запишите в виде

$$(\langle \lambda \rangle \pm \langle \Delta \lambda \rangle), \text{ м}; \quad \varepsilon, \%.$$

11. Сделайте краткие выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Получите условия возникновения главных максимумов, побочных минимумов и максимумов для дифракционной решетки.

2. Получите условия минимумов и максимумов при дифракции на щели.

3. Докажите закономерность изменения интенсивности максимумов.

4. Дайте определения угловой и линейной дисперсии. Поясните связь между угловой дисперсией и характеристиками дифракционной решетки.

5. Дайте определение разрешающей способности дифракционной решетки. Поясните критерий Рэлея для разрешения спектральных линий. Докажите связь между разрешающей способностью и числом щелей в дифракционной решетке.

6. Почему при освещении дифракционной решетки «белым светом» нулевой максимум «белый»?

7. Сформулируйте принцип Гюйгенса - Френеля. Объясните дифракцию Фраунгофера и Френеля на щели.

8. Объясните свойства зональных пластинок.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 30

ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципа действия и конструкции газового лазера и использование его как монохроматического когерентного источника для изучения явления дифракции света.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. - М.: Наука, 1980. - 752 с.
3. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.И. Калитевского. - М.: Высш. шк., 1986. - 512 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия гелий-неонового лазера

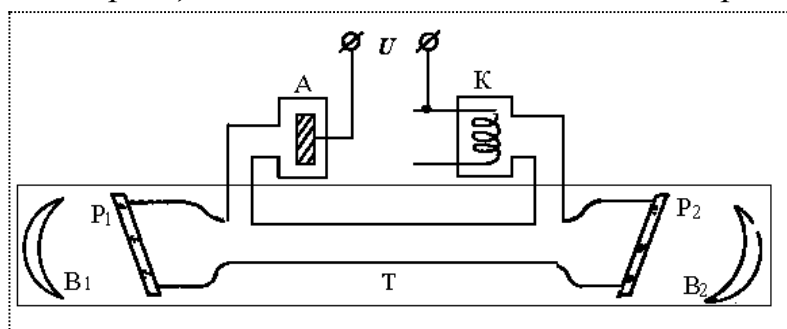


Рисунок 1

Газовый лазер представляет собой прибор, относящийся к оптическим квантовым генераторам.

Основным элементом гелиево-неонового лазера непрерывного действия является газоразрядная трубка T (рис. 1), имеющая накаливаемый катод K и анод A . Трубка наполнена смесью гелия (He) (парциальное давление He 1 мм рт. ст) и неона (Ne) (парциальное давление Ne 0,1 мм рт. ст). Внутренний диаметр трубки 1...10 мм, длина от нескольких десятков сантиметров до 1,5...3 м. Концы трубки закрыты плоскопараллельными стеклянными или кварцевыми окнами P_1 и P_2 , установленными под углом Брюстера к ее оси. Для линейно поляризованного излучения с электрическим вектором в плоскости падения коэффициент отражения от них равен нулю. Поэтому брюстеровские окна обеспечивают линейную поляризацию излучения лазера и исключают потери энергии при распространении света из активной зоны к зеркалам и обратно. Трубка помещена в резонатор, образованный зеркалами B_1 и B_2 с многослойным диэлектрическим покрытием. Такие зеркала имеют очень высокий коэффициент отражения в рабочем спектральном интервале и прак-

тически не поглощают свет. Пропускная способность зеркала, через которое преимущественно выходит излучение лазера, составляет обычно 1...2 %, другого - менее 1 %.

На электроды трубки подается напряжение 1...2 кВ. При накаливаемом катоде и указанном напряжении в наполняющих трубку газах может поддерживаться тлеющий электрический разряд. Тлеющий разряд создает условия для возникновения инверсии населенностей уровней в неоне. Типичная сила тока в газовом разряде - десятки миллиампер.

Видимое излучение разряда дает неон, но необходимое для этого возбуждение атомов осуществляется с помощью атомов гелия. Упрощенная схематическая картина энергетических уровней атомов He и Ne показана на рис. 2.

За счет соударений с электронами атомы He переходят в возбужденное состояние (2^3S и 2^1S). Эти уровни метастабильны с энергией 19,82 и 20,61 эВ соответственно. Спонтанный радиационный переход с этих уровней на основной уровень по правилам отбора запрещен, т.е. происходит с очень малой вероятностью.

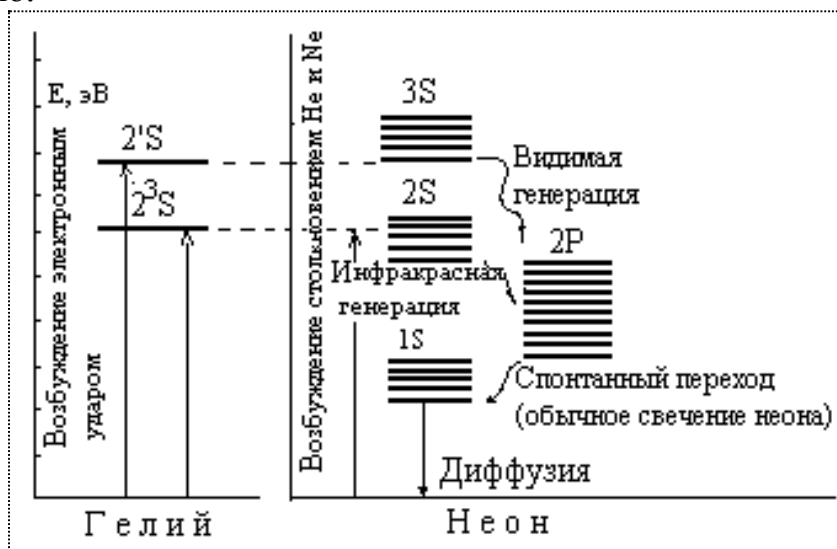


Рисунок 2

Время жизни атома на уровнях 2^1S и 2^3S велико в сравнении с временем жизни на обычных возбужденных уровнях, поэтому на этих метастабильных уровнях накапливается очень много атомов He . Но уровни неона $3S$ и $2S$ практически совпадают с метастабильными уровнями 2^1S и 2^3S гелия. Благодаря этому, при столкновении возбужденных атомов He с атомами Ne происходят переходы атомов Ne в возбужденное состояние с резонансной передачей энергии атомов гелия атомам неона.

Процесс возбуждения атомов Ne изображен горизонтальными пунктирными стрелками (рис. 2). В результате концентрации атомов неона на уровнях $3S$ и $2S$ сильно возрастают, и возникает инверсная заселенность энергетических уровней по отношению к уровню $2P$. В трубке создается активная среда, состоящая из атомов Ne , обладающих инверсной заселенностью энергетических уровней электронов.

Спонтанное излучение отдельных возбужденных атомов приводит к распространению в активной среде фотонов, соответствующих электронным переходам в атомах неона с уровней $3S$ на уровни $2P$.

Под действием электромагнитного поля распространяющихся в разряде фотонов (сначала спонтанно излученных возбужденными атомами неона) происходит индуцированное когерентное излучение других возбужденных атомов неона, т.е. активной среды, заполняющей трубку лазера. Массовое нарастание этого процесса обеспечивается многократным прохождением излучения между зеркалами B_1 и B_2 резонатора, что приводит к формированию мощного индуцированного потока направленного когерентного излучения лазера. Минимальная угловая ширина лазерного светового пучка определяется дифракцией, связанной с ограничением поперечного сечения пучка, т.е. только с волновыми свойствами света. Это важнейшее обстоятельство отличает лазерный источник от любого другого источника света.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Газовый лазер ЛГ78.
2. Оптическая скамья.
3. Блок питания.
4. Дифракционная решетка.
5. Стекланные пластины с напыленными между ними микрочастицами.
6. Экран с миллиметровой шкалой.

5. РАБОТА С ГАЗОВЫМ ЛАЗЕРОМ

Включить тумблер "Сеть". Переключатель "Регулировка тока" установлен в рабочем положении преподавателем или лаборантом. Категорически запрещается переводить его в другое положение.

Во время работы с лазером необходимо помнить, что попадание в глаза прямого лазерного излучения опасно для зрения.

Поэтому при работе с лазером его свет наблюдается после отражения на экране с рассеивающей поверхностью.

Категорически запрещается смотреть на прямой лазерный луч! Включать лазер можно только под контролем преподавателя или лаборанта

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1

Измерение длины волны излучения лазера при помощи дифракционной решетки

Направленность и пространственная когерентность излучения лазера позволяет применять его в ряде измерений без предварительной коллимации.

Установка для проведения данного упражнения включает лазер, рейтер с дифракционной решеткой, экран с миллиметровой шкалой для наблюдения дифракционной картины (рис. 3).

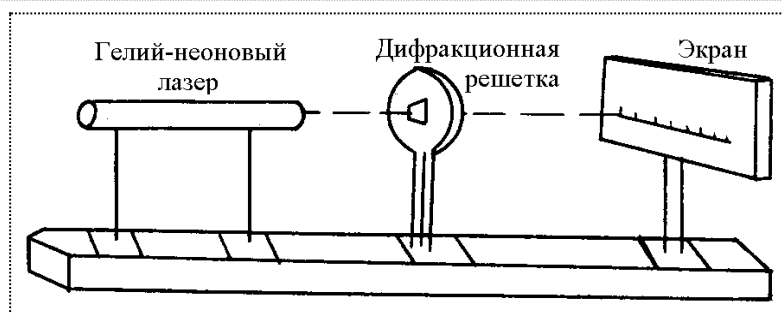


Рисунок 3

Дифракционная решетка устанавливается перпендикулярно к оси светового луча, выходящего из лазера. Для этого световой блик, отраженный от плоскости решетки, необходимо провести точно на середину выходного окна лазера, т.е. добиться совпадения выходящего из лазера светового пучка и его отражения от плоскости решетки.

Ввиду монохроматичности излучения лазера, на экране наблюдается множество неперекрывающихся дифракционных спектров различных положительных и отрицательных порядков. Эти спектры образуют на экране ряд красных полосок, повторяющих сечение первичного светового пучка, падающего на решетку.

Экран устанавливается перпендикулярно к пучку света, и порядки спектров располагают симметрично относительно нуля шкалы экрана.

Под расстоянием между дифракционными спектрами и спектром нулевого порядка надо понимать расстояние между серединами наблюдаемых спектров (полосок).

Расчет длины волны ведется по формуле

$$d \sin \varphi_k = \pm k\lambda, \quad (1)$$

где d - постоянная решетки (в нашем случае $d = 0,01$ мм); φ_k - угол дифракции; k - порядок спектра; λ - длина волны лазерного излучения.

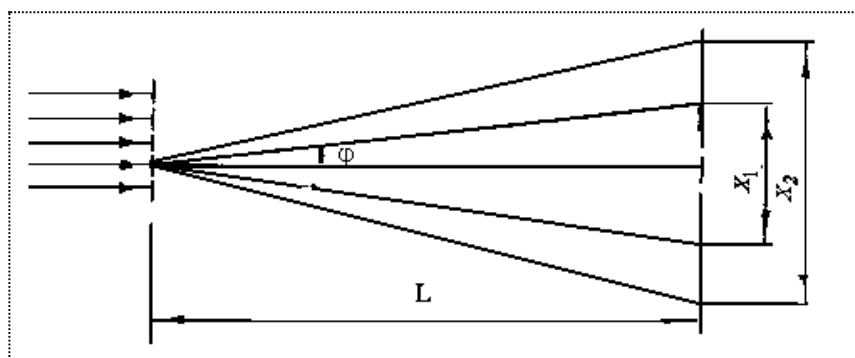


Рисунок 4

Угол дифракции определяется из соотношения

$$\frac{X_k}{2L} = \operatorname{tg} \varphi_k \approx \sin \varphi_k, \quad (2)$$

где X_k - расстояние между левым и правым максимумами порядка k ; L - расстояние от плоскости дифракционной решетки до плоскости экрана (рис. 4).

Подставляя (2) в (1), получаем

$$\lambda = \frac{X_k d}{2Lk}. \quad (3)$$

Порядок выполнения упражнения 1

1. Измерить расстояние X_k в спектре первого ($k = 1$), второго ($k = 2$) и третьего ($k = 3$) порядков при различных расстояниях экрана от дифракционной решетки.
2. Результаты измерений занести в табл. 1.
3. Вычислить длину волны, соответствующую излучению лазера.

Т а б л и ц а 1

№	$L, м$	$x, м$			$\lambda, м$			$\langle \lambda \rangle, м$	$\Delta \lambda_i, м$	$(\Delta \lambda_i)^2, м$	$\Delta S(\lambda), м$	$t_{\alpha}(n)$	$\Delta \lambda, м$	$\varepsilon, \%$
		k_1	k_2	k_3	λ_1	λ_2	λ_3							
1														
2														
3														

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислить длину волны для каждого измерения по формуле (3).
2. Вычислить среднее значение $\langle \lambda \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i$, где n - число измерений.
3. Вычислить абсолютные ошибки отдельных измерений

$$\Delta \lambda_i = \langle \lambda \rangle - \lambda_i.$$
4. Подсчитать среднюю квадратичную погрешность

$$\Delta S_{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta \lambda_i^2}{n(n-1)}}.$$
5. Задать значение надежности α (по указанию преподавателя).
6. Определить по таблице Стьюдента $t_{\alpha}(n)$ и вычислить границы доверительного интервала $\Delta \lambda = t_{\alpha}(n) \Delta S_{\bar{\lambda}}$.
7. Вычислить относительную погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle}$. Значение найденной величины λ использовать в расчетах, необходимых в следующем упражнении.

Упражнение 2

Фраунгоферова дифракция лазерного излучения на малых круглых частицах

Монохроматический, хорошо коллимированный и пространственно когерентный луч лазера дает возможность непосредственно наблюдать дифракцию света на круглых частицах.

Для того чтобы углы дифракции на частицах были значительными, размер частиц должен быть малым. Однако если в световой пучок поместить одну малую частицу, то даваемую ей на удаленном экране дифракционную картину наблюдать будет трудно, т.к. картина будет проектироваться на светлый фон, созданный частью светового пучка, не испытавшей дифракцию.

Для получения хорошо видимой дифракционной картины нужно поместить на пути светового пучка множество хаотически расположенных одинаковых частиц. В самом деле, поскольку исследуется фраунгоферова дифракция, любая отдельная частица, независимо от ее положения в плоскости поперечного сечения светового пучка, дает одинаковое распределение дифрагированного света.

При одновременном присутствии в сечении пучка многих частиц, угловое распределение дифрагированного света, создаваемого каждой частицей в отдельности, не нарушается, если нет систематического интерференционного эффекта между световыми пучками, дифрагировавшими на разных частицах.

Если в плоскости поперечного сечения светового пучка частицы расположены хаотически, то в силу равной вероятности всех значений фаз волн, дифрагированных по различным направлениям, складываться будут только интенсивности световых пучков, дифрагированных на разных частицах. Дифракционная картина от N частиц усилится по интенсивности в N раз по сравнению с дифракционной картиной отдельной частицы, не изменяя своей структуры. Это обстоятельство и используется в настоящем эксперименте.

Установка остается той же, что и в упражнении 1, но вместо дифракционной решетки на рейтере устанавливается оправка со стеклянными пластинами, между которыми напылены частички ликоподия (споры растения плауна), представляющие собой шарики, приблизительно одинакового малого размера.

На экране после включения лазера можно будет наблюдать систему концентрических светлых и темных дифракционных колец, окружающих светлый круг.

Угловые радиусы α_i темных колец подчиняются соотношениям:

$$\sin \alpha_1 = 0,61 \frac{\lambda}{r}; \sin \alpha_3 = 1,11 \frac{\lambda}{r}, \sin \alpha_5 = 1,62 \frac{\lambda}{r}. \quad (4)$$

Угловые радиусы α_i светлых колец

$$\sin \alpha_2 = 0,82 \frac{\lambda}{r}; \sin \alpha_4 = 1,34 \frac{\lambda}{r}, \quad (5)$$

где r - радиус частицы, вызвавшей дифракцию света.

Значения $\sin \alpha_i$ рассчитываются из условия

$$\sin \alpha_i \approx \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{D_i}{2L}, \quad (6)$$

где D_i - линейный диаметр соответствующего дифракционного кольца на экране; L - расстояние от стеклянной пластины до экрана.

*Порядок выполнения упражнения 2
и обработка экспериментальных данных*

1. Измерить диаметры первого (D_1) и второго (D_3) темных колец при различных расстояниях L . Результаты занести в табл. 2.
2. Построить график зависимости $D = f(L)$ для каждого из дифракционных минимумов, т.е. $D_1 = f(L)$ и $D_3 = f(L)$.
3. Определить тангенсы углов дифракции, соответствующих первому и второму темному кольцу, используя формулу (6), и среднее значение радиуса частицы с помощью соотношений (4).
4. Определить погрешность измерений. Записать окончательный результат в виде $r = \langle r \rangle \pm \langle \Delta r \rangle$ (м).
5. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2

№ опыта	L , м	D_1 , м	D_2 , м	$\text{tg}\alpha_1$	$\text{tg}\alpha_2$	r_1 , м	r_2 , м	$(\langle r \rangle \pm \Delta r)$, м	ε , %
1									
2									
3									

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип действия и конструкцию газового лазера.
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса - Френеля. Как он применяется при изучении явлений дифракции? Что такое зоны Френеля?
3. В чем заключается дифракция Фраунгофера и дифракция Френеля?
4. Получите условия главных максимумов, побочных максимумов для дифракционной решетки.
5. Получите условия главных максимумов при дифракции света на щели.
6. Что такое разрешающая сила дифракционной решетки и как она изменяется с изменением числа щелей?
7. Что такое линейная, угловая дисперсии дифракционной решетки и как они определяются?
8. Объясните дифракцию Фраунгофера на системе малых круглых частиц. Как зависит интенсивность дифракционной картины от числа частиц?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 31**ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА
ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫМ ВЕЩЕСТВОМ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Наблюдение явления вращения плоскости поляризации света раствором сахара.
2. Определение концентрации сахара в растворах по углу поворота плоскости поляризации света.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Свет представляет собой поперечную электромагнитную волну, которая характеризуется напряженностями электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей. Векторы \vec{E} и \vec{H} колеблются во взаимно перпендикулярных направлениях в одинаковой фазе, а скорость распространения волны \vec{V} перпендикулярна векторам \vec{E} и \vec{H} (рисунок 1). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного вектора (\vec{E} или \vec{H}). Обычно выбирают вектор \vec{E} , называя его световым вектором, так как физиологическое, фотохимическое и фотоэлектрическое действия света вызываются колебаниями именно этого вектора.

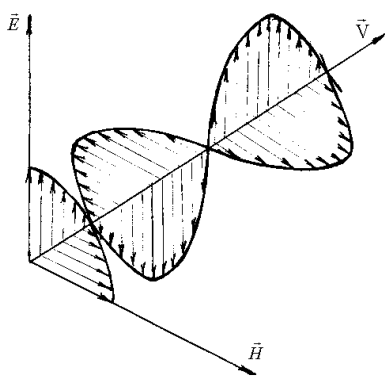


Рисунок 1

Световая волна складывается из множества независимых световых излучений отдельных атомов, поэтому различные направления колебания вектора \vec{E} в ней равновероятны. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \vec{E} называется естественным. Свет, в котором колебания светового вектора каким-то образом упорядочены, называется поляризованным.

Если колебания светового вектора происходят только в одной плоскости, то это плоскополяризованный свет. Плоскость, в которой колеблется вектор \vec{E} , называется плоскостью колебаний. Плоскостью поляризации называется плоскость, в которой колеблется вектор \vec{H} . Если вектор \vec{E} меняется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной лучу, то свет является эллиптически поляризованным, если круг - поляризованным по кругу.

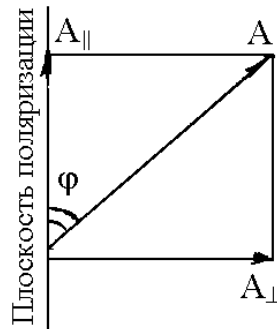


Рисунок 2

Поляризованный свет получают с помощью поляризаторов, пропускающих колебания только определенного направления (кристаллы исландского шпата, турмалина, кварца, поляроиды). Поляризаторы свободно пропускают колебания, параллельные плоскости, называемой плоскостью поляризатора, и полностью задерживают перпендикулярные к ней. Колебания с амплитудой A , совершающиеся в плоскости, образующей угол φ с плоскостью поляризатора, можно разложить на два колебания с амплитудами

$$A_{\parallel} = A \cos \varphi \quad \text{и} \quad A_{\perp} = A \sin \varphi$$

(рис. 2). Первое колебание пройдет через прибор, а второе будет задержано. Интенсивность прошедшей волны

$$A_{\parallel}^2 = A^2 \cos^2 \varphi = I \cos^2 \varphi.$$

В естественном свете все значения φ равновероятны, поэтому доля света, прошедшего через поляризатор, будет равна среднему значению $\cos^2 \varphi = 1/2$. При вращении поляризатора вокруг направления естественного луча интенсивность прошедшего света не изменяется, а меняться будет лишь ориентация плоскости его колебаний.

Если на поляризатор падает плоскополяризованный свет амплитуды A_0 и интенсивности I_0 , то пройдет составляющая колебания с амплитудой $A = A_0 \cos \varphi$ и интенсивность прошедшего света равна $I = I_0 \cos^2 \varphi$. Это соотношение называется законом Малюса. При наличии двух поляризаторов, плоскости поляризации которых образуют угол φ , и падении на первый естественного света, из первого выйдет свет интенсивности $\frac{1}{2} I_{\text{ест.}}$, а из второго –

$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест.}} \cos^2 \varphi$. При $\varphi = 0$, $I_{\text{max}} = \frac{1}{2} I_{\text{ест.}}$, при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $I_{\text{min}} = 0$ - поляризаторы

скрещены. При вращении второго поляризатора вокруг направления луча будем наблюдать изменение интенсивности света от I_{max} до I_{min} .

Поляризованный свет можно получить и при падении естественного света на границу раздела двух диэлектриков (например, на поверхность стеклянной пластинки). Если угол падения отличен от нуля, то отраженный и преломленный лучи будут частично поляризованы. Степень поляризации зависит от угла падения. Д. Брюстер установил, что при угле падения, определяемом соотношением $\operatorname{tg} i = \frac{n_2}{n_1}$, отраженный луч полностью поляризован

(содержит только колебания перпендикулярные плоскости падения), а преломленный - частично (рис. 3). Отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. Степень поляризации преломленного луча можно увеличить, пропустив его через набор параллельных стеклянных пластинок, называемый стопой.

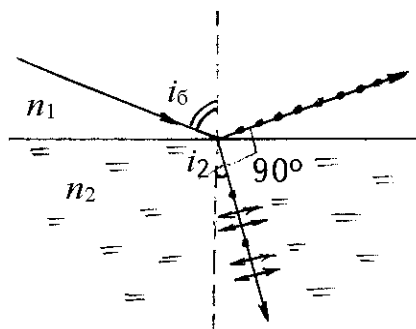


Рисунок 3

Все прозрачные кристаллы (кроме имеющих кубическую решетку) обладают способностью двойного лучепреломления, обнаруженного впервые Э. Бартолином в кристалле исландского шпата. Двойное лучепреломление заключается в том, что в кристалле луч света разделяется на два: обыкновенный (о) и необыкновенный (е) (рис. 4).

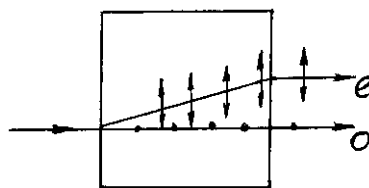


Рисунок 4

Обыкновенный подчиняется всем законам геометрической оптики, а необыкновенный не лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к границе раздела сред и для него отношение $\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$ не остается постоянным

при изменении угла падения i_1 . Однако, в кристалле есть направление, вдоль которого лучи распространяются с одинаковой скоростью, не разделяясь. Любая прямая, параллельная данному направлению, является оптической осью кристалла. Плоскость, проходящая через луч и оптическую ось кристалла, называется главной плоскостью. Оба луча плоскополяризованы, при-

чем необыкновенный в главной плоскости, а обыкновенный перпендикулярно к ней. Кристаллы бывают одноосные и двуосные.

Для получения поляризованного света обычно применяют призмы и поляроиды. Призмы делятся на поляризационные, дающие только плоско поляризованный луч и двоякопреломляющие, дающие два луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Примером поляризационной призмы может служить призма Николя, представляющая собой две призмы из исландского шпата, склеенные канадским бальзамом (смолообразное вещество, получаемое из канадской пихты, с $n = 1,55$) (рис. 5). Обыкновенный луч на границе AB испытывает полное внутреннее отражение ($n_o=1,66$) и поглощается зачерненной боковой поверхностью CB . Необыкновенный выходит параллельно падающему лучу, незначительно сместившись.

Двоякопреломляющие кристаллы обладают свойством дихроизма, то есть различного поглощения света в зависимости от ориентации вектора \vec{E} . Например, пластинка турмалина толщиной 1 мм поглощает обыкновенный луч, пропуская только необыкновенный. Различие в поглощении зависит и от длины волны, что дает различную окраску кристалла по разным направлениям при освещении его белым светом. Дихроичные кристаллы применяются при изготовлении поляроидов. Примером поляроида может служить тонкая пленка из целлулоида, в которую вкраплены кристаллики герапатита (сернокислого йодхинина). Такая пленка при толщине около 1 мм полностью поглощает обыкновенные лучи в видимой области спектра. Поляроиды могут иметь большую площадь, но они менее прозрачны и термостойки, чем призмы.

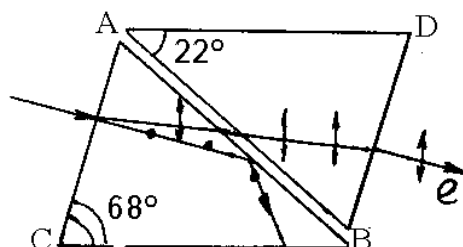


Рисунок 5

Оптическую анизотропию можно получить и искусственно. Оптически изотропные вещества становятся анизотропными под действием:

- 1) одностороннего сжатия или растяжения (кристаллы кубической системы, стекла);
- 2) электрического поля (жидкости, аморфные тела, газы);
- 3) магнитного поля (жидкости, стекла, коллоиды).

Некоторые вещества (например, кварц, сахар, киноварь, винная кислота, скипидар) обладают способностью поворачивать плоскость поляризации и называются оптически активными. Они разделяются на право- и левовращающие. Вращение плоскости поляризации было объяснено О.Френелем. Плоскополяризованный свет можно рассматривать, как наложение двух лучей с одинаковой частотой и скоростью распространения, но поляризованных по кругу вправо и влево. Вследствие наложения световых векторов обоих коле-

баний результирующий вектор \vec{E}_0 в каждой точке поля располагается в одной плоскости. В оптически активной среде скорость распространения лучей, поляризованных по кругу вправо и влево, различна. В таких средах результирующий вектор \vec{E} отклоняется относительно \vec{E}_0 на угол тем больший, чем больше длина пути света в данной среде.

Для величины угла поворота плоскости поляризации раствором экспериментально установлена следующая закономерность:

$$\alpha = \alpha_0 cl,$$

где α_0 - удельная постоянная вращения; c - концентрация раствора; l - длина пути луча в растворе.

Измерив α , l и зная α_0 , можно определить концентрацию раствора.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Сахариметр универсальный.
2. Поляриметрическая трубка.
3. Растворы сахара различной концентрации.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Оптическая схема универсального сахариметра представлена на рис. 6.

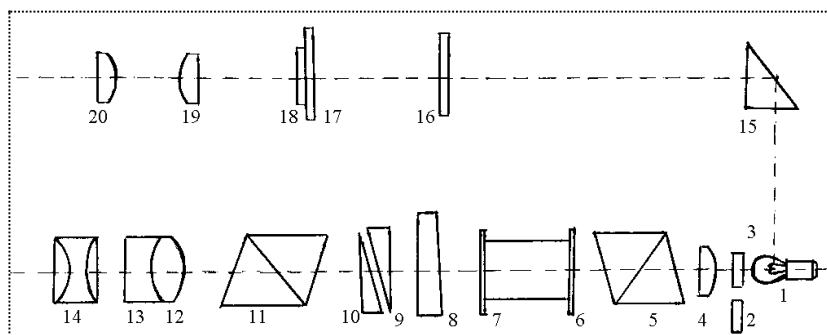


Рисунок 6

Здесь 1 - электрическая лампочка; 2 - светофильтр; 3 - матовое стекло; 4 - конденсорная линза; 5 - поляризатор (призма Николя); 6, 7 - трубка с раствором сахара; 8 - неподвижный кварцевый клин; 9, 10 - подвижные кварцевые клинья. Кварцевые клинья 8, 9, 10 образуют компенсатор. Клин 8 сделан из левовращающего кварца, а клинья 9, 10 - из правовращающего. Меняя на пути луча толщину клина 10, можно поворачивать плоскость поляризации света вправо на различные углы. 11 - анализатор, обнаруживающий поворот плоскости поляризации.

Для большей точности результатов в сахариметрах используют "полутеневые" анализаторы. Для изготовления такого анализатора обычный Николь режут вдоль диагонали, проходящей через тупые углы и у каждой половины сошлифовывают по небольшому клинообразному слою, а затем эти половины склеивают. Колебания, пропускаемые правой и левой половинами такого анализатора, составляют между собой небольшой угол. Если плоскость коле-

баний вектора \vec{E} перпендикулярна плоскости склеивания половинок призмы, то эти половинки анализатора освещены равномерно. При повороте плоскости колебаний падающего луча однородность освещения нарушается. 12, 13 - линзы объектива зрительной трубы; 14 - окуляр зрительной трубы. Зрительная труба дает увеличенное изображение линии раздела поля зрения прибора. 15 - отражательная призма, поворачивающая луч света от лампочки на угол 90° для освещения шкалы прибора. 16 - защитное стекло, рассеивающее свет. 17 - шкала, 18 - нониус. 19, 20 - лупа, состоящая из двух линз. Шкала 17 связана с подвижным кварцевым клином, поэтому смещение клина пропорциональное углу поворота плоскости поляризации, передается на шкалу и отсчитывается при помощи лупы.

Основными частями прибора являются узел измерительной головки и осветительный узел, соединенные между собой траверсой, на которой укреплена камера для поляризметрических трубок. В нижней части измерительной головки находится рукоятка кремальерной передачи для перемещения подвижного кварцевого клина и шкалы.

В сахариметре применяется шкала Вентцке. Сахариметр показывает 100, когда в поляризметрическую трубку длиной 200 мм при 20°C налит раствор, содержащий в 100 см^3 26,026 г химически чистой сахарозы. Отсюда следует, что для получения концентрации раствора нужно отсчитанные по шкале градусы умножить на 0,26026.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить сахариметр в сеть.
2. Отрегулировать окуляры по глазу наблюдателя так, чтобы четко была видна вертикальная линия, разделяющая поле зрения на две половинки, штрихи и цифры шкалы.
3. Проверить установку прибора на нуль. Половинки поля зрения должны быть одинаково освещены при совмещении нулей шкалы и нониуса, если в камере отсутствует поляризметрическая трубка.
4. В камеру прибора поместить поляризметрическую трубку с одним из растворов. При этом нарушается одноцветность половинок зрения. Вращая рукоятку кремальерной передачи добиться одинаковой освещенности поля зрения. Произвести отсчет показаний с точностью до 0,1 деления шкалы (при помощи нониуса). Измерения повторить три раза.
5. Измерить по три раза углы поворота плоскости поляризации всеми растворами сахара и данные занести в табл. 1.
6. Для каждого раствора найти среднее значение $\langle\alpha\rangle$ и по формуле $c = \frac{z \cdot \rho}{100}$ определить концентрацию в кг/м^3 .

7. По формуле $\langle\alpha_{0i}\rangle = \frac{\langle\alpha\rangle}{c \cdot l}$ вычислить удельную постоянную вращения.

8. Определить среднее значение $\langle \alpha_0 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{0i}}{n}$.

9. Найти абсолютные погрешности $\langle \alpha_0 \rangle \pm \alpha_{0i}$ и среднюю абсолютную погрешность $\langle \Delta \alpha_0 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta \alpha_{0i}|}{n}$.

10. Результат записать в виде

$$\alpha_0 = \langle \alpha_0 \rangle \pm \langle \Delta \alpha_0 \rangle; \varepsilon = \frac{\langle \Delta \alpha_0 \rangle}{\langle \alpha_0 \rangle} \cdot 100\%$$

11. Определить концентрацию неизвестного раствора

$$C_x = \frac{\langle \alpha \rangle}{\alpha_0 \cdot l}$$

12. Построить график зависимости $Z = f(\alpha)$ и найти по нему концентрацию в процентах для неизвестного раствора.

13. По формуле $\rho_x = \frac{C_x \cdot 100}{Z}$ найти плотность раствора.

14. Полученные результаты занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№	Z, %	$\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	α_i , °ВТЦ	$\langle \alpha \rangle$, °ВТЦ	C, кг/м ³	α_{0i} , °ВТЦ·м ² /кг	$\langle \alpha_0 \rangle$, °ВТЦ·м ² /кг	$\Delta \alpha_{0i}$, °ВТЦ·м ² /кг

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется поляризованным по кругу и эллипсу вправо и влево, плоскополяризованным?

2. Какими методами можно получить плоскополяризованный свет? В чем заключается явление двойного лучепреломления?

3. Каковы свойства необыкновенного луча?

4. Как устроена призма Николя?

5. Сформулируйте законы Малюса и Брюстера.

6. Как устроен полутеневого анализатор?

7. Какие вещества называются оптически активными?

8. Как устроен сахариметр и в чем заключается принцип его действия?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 32

ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение постоянной Верде жидкости.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Оптически неактивные вещества, будучи помещенными в магнитное поле, поворачивают плоскость поляризации проходящей световой волны (эффект Фарадея). Это явление наблюдается в любых прозрачных веществах - твердых, жидких, газообразных. Таким образом, магнитное поле превращает оптически неактивную среду в анизотропную. Качественное объяснение эффекта Фарадея заключается в следующем. Взаимодействие магнитного поля с токами орбитальных электронов приводит к перераспределению электронного заряда в атомах и молекулах. Вследствие этого способность электронов совершать колебания под действием внешнего периодического электрического поля \vec{E} становится разной для различных направлений движения частиц. Как известно, отклик электронов на внешнее воздействие определяет скорость распространения электромагнитной волны в среде. Поскольку в простейшем случае направление движения заряженной частицы коллинеарно вектору \vec{E} , то скорость волны будет зависеть от направления напряженности электрического поля. Линейно поляризованный свет можно разложить на суперпозицию двух компонент, световые векторы которых вращаются во взаимно перпендикулярных направлениях. Ввиду различия скоростей распространения этих компонент в магнитном поле плоскость поляризации света после прохождения через вещество повернется на некоторый угол

$$\varphi = \frac{f\omega \cos \theta}{2cn_0} lH, \quad (1)$$

где ω - частота света; n_0 - показатель преломления среды в отсутствие магнитного поля H ; c - скорость света в вакууме; l - длина пути света в веществе; θ - угол между направлением вектора напряженности магнитного поля и направлением распространения световой волны; f - постоянная, зависящая от природы вещества. Постоянная f может быть как отрицательной, так и положительной. Если $f > 0$ и векторы \vec{H} и \vec{k} параллельны друг другу ($\cos \theta = 1$), то направление вращения плоскости поляризации совпадает с направлением

вектора \vec{k} . При этом, если смотреть вдоль вектора \vec{k} , плоскость поляризации поворачивается по часовой стрелке. Такие вещества называются правовращающими. В случае левовращающих веществ $f < 0$, и плоскость поляризации поворачивается против часовой стрелки.

Из выражения (1) вытекает, что абсолютная величина угла поворота φ максимальна, когда волновой вектор \vec{k} коллинеарен вектору напряженности магнитного поля \vec{H} . Коэффициент $\rho = \frac{f\omega}{2cn_0}$ называют постоянной Верде.

Следовательно, при $\cos \theta = 1$ формулу (1) можно записать в виде

$$\varphi = \rho l H. \quad (2)$$

Подчеркнем, что при заданном направлении магнитного поля направление вращения плоскости поляризации (по отношению к волновому вектору \vec{k}) в случае изменения знака \vec{k} меняется на обратное: правое вращение переходит в левое и наоборот. Поэтому, если луч проходит один путь дважды (например, после отражения от зеркала), то суммарный угол поворота φ будет вдвое больше, чем после одного прохождения.

4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа проводится на приборе, называемом сахариметром (рис. 1). Свет от лампы 1 проходит через поляризатор 2, исследуемое вещество 3, компенсатор 4 и поляризатор 5.

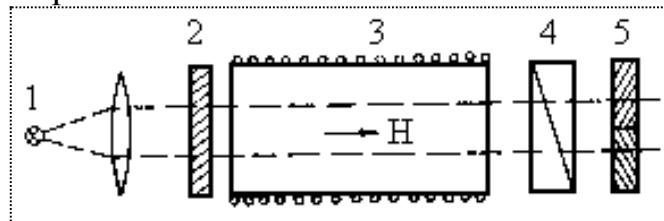


Рисунок 1

Компенсатор состоит из двух кварцевых клиньев: неподвижного - правовращающего и подвижного - левовращающего. Перемещая подвижный клин перпендикулярно к оптической оси прибора, можно скомпенсировать любой поворот плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Поляризатор 5 состоит из двух частей, плоскости которых P_1 и P_2 (рис. 2) образуют между собой небольшой угол α . При прохождении плоскополяризованного света через такой поляризатор в поле зрения окуляра прибора образуются два световых поля сравнения.

В общем случае амплитуды A_1 и A_2 колебаний, пропущенных каждой частью поляризатора 5, будут различны (это видно из рис. 2, где \vec{A} - световой вектор падающего плоскополяризованного света). Следовательно, различными будут и яркости обоих полей сравнения. Яркости полей станут равными, если плоскость колебаний светового вектора \vec{A} установить симметрично относительно направлений P_1 и P_2 . Это осуществляется перемещением клина компенсатора.

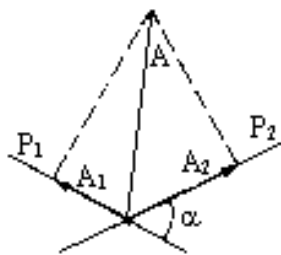


Рисунок 2

Внешний вид сахариметра показан на рисунке 3. Здесь 1 - осветительная головка, в котором находится лампочка, линза, светофильтр и поляризатор; 2 - соленоид, в который вставляют трубку с исследуемой жидкостью; 3 - измерительный узел (в нем находится компенсатор, поляризатор и круговая шкала с нониусом); 4 - отсчетная лупа; 5 - окуляр; 6 - рукоятка для перемещения подвижного клина компенсатора и связанной с ним отсчетной шкалы. Сто делений отсчетной шкалы соответствуют углу $34,62^\circ$.

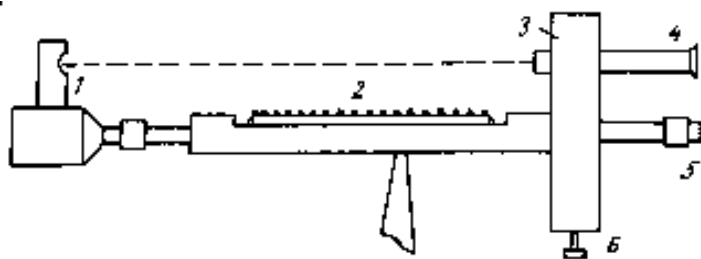


Рисунок 3

Соленоид питается от сети через выпрямитель, на передней панели которого расположены: регулятор напряжения (справа), вольтметр, амперметр и кнопка (слева) - для подключения соленоида.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите электрическую лампочку сахариметра. Отрегулируйте окуляры по глазу наблюдателя так, чтобы четко были видны вертикальная линия, разделяющая поле зрения на две половины, штрихи и цифры шкалы.

2. Проверьте установку прибора на нуль. Для этого при отсутствии в камере поляриметрической трубки, вращая рукоятку кремальной передачи, добейтесь полной одноцветности обеих половин поля зрения. При этом нулевые деления шкалы и нониуса должны совпадать.

3. В камеру прибора поместите поляриметрическую трубку с исследуемым веществом.

4. Включите ток I_1 . Вращением анализатора добейтесь равномерной освещенности поля зрения.

5. Запишите отсчет по лимбу анализатора (значение угла φ в градусах Вентцке).

6. Переключателем измените направление тока и запишите новое значение угла φ' .

7. Учитывая знак направления поля, определите результирующее значение угла

$$\langle \varphi \rangle = \frac{1}{2}(\varphi - (-\varphi')) = \frac{1}{2}(\varphi + \varphi') \square.$$

8. Выразите значения угла φ в угловых минутах, учитывая, что $1^\circ \text{ Втц} = 0.3462^\circ \text{ угл.}$; $1^\circ \text{ угловой} = 60 \text{ угл. минут}$. $\varphi \text{ угл. мин} = \varphi \times 0,3462 \times 60 \square$.

9. Эксперимент повторите для нескольких значений силы тока.

10. Данные занесите в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Сила тока, А	φ г.р. Втц.	φ' г.р. Втц.	$\langle \varphi \rangle = \frac{1}{2}(\varphi + \varphi')$ г.р. Втц.	$\langle \varphi \rangle$ угл.мин	H , А/м	ρ , угл.мин/А

11. Напряженность магнитного поля рассчитайте по формуле

$$H = \frac{IN}{L} = In,$$

где L - длина соленоида; N - число витков.

12. Постройте график зависимости $\varphi \square = f(H)$, где $\varphi = \rho l H$.

13. Определите постоянную Верде ρ , разделив угловой коэффициент наклона прямой на длину кюветы l .

14. Результаты экспериментальных измерений занесите в табл. 1 и сделайте краткий вывод по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется поляризованным по кругу и эллипсу вправо и влево, плоскополяризованным?

2. Какими методами можно получить плоскополяризованный свет?

3. Поясните явление двойного лучепреломления.

4. Каковы свойства необыкновенного луча?

5. Объясните устройство и назначение призмы Николя.

6. Сформулируйте законы Малюса и Брюстера.

7. Объясните устройство полутеневого анализатора.

8. Какие вещества называются оптически активными?

9. Как устроен сахариметр и в чем заключается принцип его действия?

10. В чем заключается эффект Фарадея?

11. Как из графика $\varphi \square = f(H)$ определяется ρ ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 33**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМ
ФОТОЭФФЕКТОМ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучение закономерностей внешнего фотоэффекта. Построение вольт - амперных и люкс - амперных характеристик вакуумного и газонаполненного фотоэлементов, определение чувствительности фотоэлементов.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. - 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Академия, 2009. - 720 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Выход электронов из твердых и жидких веществ под действием коротковолнового электромагнитного излучения называется внешним фотоэффектом. Явление открыто Г. Герцем и объяснено А. Эйнштейном на основе квантовых представлений о природе света.

В металлах внешний фотоэффект является результатом взаимодействия квантов света - фотонов с находящимися вблизи поверхности тела электронами проводимости. При столкновении с одним из таких электронов фотон передает ему свою энергию. Для того чтобы электрон проводимости мог покинуть металл, энергия фотона должна превосходить работу выхода электрона из металла ($A_{вых}$).

На основе закона сохранения энергии для электрон-фотонного столкновения можно записать соотношение (уравнение Эйнштейна)

$$h\nu = A_{вых} + \frac{mv_{max}^2}{2}, \quad (1)$$

где $h\nu$ - энергия фотона; v_{max} - максимальная скорость фотоэлектронов.

Уравнение (1) определяет, в частности, минимальную частоту света ν_0 («красная граница»), при которой еще возможен фотоэффект:

$$\nu_0 = \frac{A_{вых}}{h}. \quad (2)$$

Следует отметить, что «красная граница» ν_0 представляет собой порог для однофотонного фотоэффекта, при котором электрон вырывается из металла за счет поглощения одного фотона. Вместе с тем, электрон может приобрести достаточную для вылета энергию также и в том случае, если частота падающего света меньше ν_0 , но для этого он должен «поглотить» два, три или более фотонов. Обычно вероятность двойного и тройного столкновения электрона с фотонами ничтожно мала, но при больших интенсивностях света

в мощных световых пучках, полученных с помощью лазеров, вклад многофотонных процессов становится достаточно заметным и «красная граница» фотоэффекта тогда не является однозначно определенной.

Фотоэффект широко используется в науке и технике для регистрации и измерения световых потоков, для непосредственного преобразования энергии света в энергию электрического тока, для преобразования световых сигналов в электрические. Приборы, действие которых основано на использовании фотоэлектрического эффекта, называются фотоэлементами. Вакуумный фотоэлемент представляет собой evacuated стеклянный баллон, часть внутренней поверхности которого покрыта слоем металла, играющего роль фотокатода. В качестве анода используется металлическое кольцо или редкая сетка, также находящаяся внутри баллона. Фотоэлемент включается в цепь источника постоянного тока. При освещении катода светом в цепи возникает фотоэлектрический ток. Отношение величины фототока i_ϕ к величине падающего на фотокатод светового потока Φ называется интегральной чувствительностью фотоэлемента

$$\gamma = \frac{i_\phi}{\Phi}. \quad (3)$$

Чувствительность фотоэлемента зависит от спектрального состава света и от напряжения, приложенного к фотоэлементу. Максимальное значение тока $i_{\phi n}$, называемое фототоком насыщения, наблюдается при таких напряжениях U , когда все электроны, выбиваемые из катода, достигают анода, т.е.

$$i_{\phi n} = en, \quad (4)$$

где n - число фотоэлектронов, вылетающих из катода за время $t = 1$ с. При фототоке насыщения чувствительность фотоэлемента максимальна.

Фототок насыщения и интегральную чувствительность можно значительно увеличить путем заполнения баллона фотоэлемента разреженным инертным газом (обычно аргоном) при давлениях от 1,33 до 13,3 Па. Такие фотоэлементы называются газонаполненными. Большая чувствительность газонаполненного элемента, чем подобного вакуумного, обусловлена увеличением числа носителей тока вследствие ударной ионизации молекул газа электронами. Газонаполненные фотоэлементы, однако, менее стабильны в работе и обладают большей инерционностью, чем вакуумные. Следует помнить, что напряжение на фотоэлементе не может превышать напряжение зажигания электрического разряда в газе, наполняющем фотоэлемент. В противном случае возникает самостоятельный газовый разряд и величина фототока уже не будет определяться световым потоком, падающим на катод.

Вольт-амперной характеристикой фотоэлемента называется зависимость фототока i_ϕ от приложенного напряжения U между анодом и фотокатодом при фиксированном значении светового потока Φ . Люкс-амперная характеристика фотоэлемента представляет собой зависимость фототока от величины светового потока, падающего на фотоэлемент при постоянном напряжении на фотоэлементе.

Известно, что при облучении фотокатода светом, энергия квантов которого больше работы выхода электронов из металла ($h\nu > A_{\text{вых}}$), через фотоэлемент проходит небольшой ток даже в отсутствие ускоряющей разности потенциалов между анодом и катодом (при $U = 0$). Это обусловлено тем, что некоторые фотоэлектроны, вырывающиеся с фотокатода, обладают кинетической энергией, достаточной для достижения анода. Чтобы прекратить этот ток, надо подать на анод задерживающий потенциал φ_3 по отношению к фотокатоду. Очевидно, что

$$e\varphi_3 = \frac{mv_m^2}{2}, \quad (5)$$

где e - заряд электрона. Измерение задерживающего потенциала позволяет экспериментально определить работу выхода электрона из металла на основании уравнения Эйнштейна (соотношение (1)).

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Оптическая скамья, проекционный фонарь, светофильтры.
2. Фотоэлементы (вакуумный и газонаполненный).
3. Источник постоянного тока, вольтметр, микроамперметр, потенциометр.
4. Измерительная линейка, штангенциркуль.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить на оптическую скамью проекционный фонарь, вакуумный фотоэлемент и один из светофильтров, собрать электрическую схему, показанную на рис. 1.

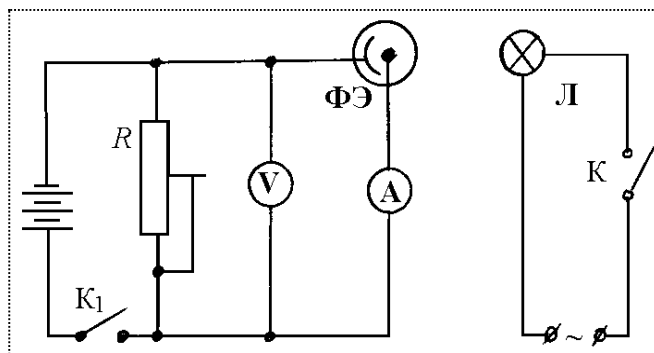


Рисунок 1

2. Включить проекционный фонарь (ключ K). Выполнить юстировку оптической схемы так, чтобы при заданном расстоянии от источника света до фотоэлемента освещенность фотокатода была наибольшей.
3. Включить электропитание фотоэлемента (ключ K_1). Снять вольт-амперную характеристику фотоэлемента, изменяя с помощью потенциометра напряжение U в диапазоне от 0 до 100 В и определяя соответствующий фототок i_{ϕ} . Данные занести в табл. 1.
4. Заменить светофильтр и вновь измерить вольт-амперную характеристику фотоэлемента.

5. Снять люкс-амперные характеристики фотоэлемента, передвигая фотоэлемент по оптической скамье и определяя фототок i_{ϕ} при различных расстояниях l от источника света до фотоэлемента. Напряжение на фотоэлементе поддерживать постоянным. Световой поток определять как

$$\Phi = \frac{IS}{l^2},$$

где I - сила света источника в канделах; S - эффективная площадь фотокатода. Измерения выполнить при обоих светофильтрах, данные занести в табл. 2.

6. Установить на оптической скамье газонаполненный фотоэлемент и выполнить те же измерения, что и для вакуумного фотоэлемента согласно пунктам 2...5.

7. Построить вольт-амперные и люкс-амперные характеристики для вакуумного и газонаполненного фотоэлементов при обоих светофильтрах.

Т а б л и ц а 1

Вольт-амперная характеристика				
вакуумный фотоэлемент			газонаполненный фотоэлемент	
$U, В$	$I_{\text{фиолет}}, мА$	$I_{\text{оранж}}, мА$	$I_{\text{фиолет}}, мА$	$I_{\text{оранж}}, мА$

Т а б л и ц а 2

Люкс-амперная характеристика						
вакуумный фотоэлемент				газонаполненный фотоэлемент		
$l, м$	$I_{\text{фиолет}}, мА$	$I_{\text{оранж}}, мА$	$\Phi, лм$	$I_{\text{фиолет}}, мА$	$I_{\text{оранж}}, мА$	$\Phi, лм$
0,1						
0,2						
0,3						
0,4						
0,5						
0,6						

8. Рассчитать чувствительности фотоэлементов по формуле (3). Для вакуумного фотоэлемента чувствительность следует определять при фототоке насыщения. Чувствительность газонаполненного фотоэлемента находить соответственно при фототоке, равном фототоку насыщения в вакуумном фотоэлементе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте понятие фотона, его энергии, массы, импульса.
2. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта, понятие «красной границы» фотоэффекта.
3. Как можно экспериментально определить максимальную скорость фотоэлектронов, «красную границу» фотоэффекта, работу выхода электрона из металла?
4. Каковы особенности фотоэффекта при больших интенсивностях света?
5. Какие характерные отличия наблюдаются в работе газонаполненных фотоэлементов по сравнению с вакуумными, и чем они обусловлены?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 34**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Изучение принципа работы и устройства пирометра.
2. Определение постоянной Стефана - Больцмана.
3. Проверка закона излучения Кирхгофа и закона смещения Вина.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
2. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - М.: Наука, 1989. - 301 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Всякое излучение телами электромагнитных волн сопровождается потерей энергии. Поэтому излучение может осуществляться либо за счет убыли энергии самого тела, либо за счет того, что тело получает энергию извне. Излучение телом энергии может происходить в результате различных по своей природе процессов: фотолюминисценции, хемилюминисценции, свечения разреженного газа, теплового излучения. В последнем случае энергия излучения берется за счет передачи телу извне некоторого количества тепла и в конечном счете этот процесс связан с различными видами теплового движения молекул нагретого тела. Диапазон генерируемых электромагнитных волн определяется температурой тела. При низких температурах излучаются практически лишь электромагнитные волны инфракрасного диапазона. При достаточно высоких температурах часть излучения располагается в области видимого света. Интенсивность излучения и распределение энергии по частотам (спектральное распределение) зависит от температуры излучающего тела и его физико-химических свойств. Однако в случае твердых тел основную роль играет температура.

Если тело получает от окружающей среды путем поглощения энергии количество тепла, компенсирующее убыль его энергии за счет собственного излучения, то процесс называют тепловым равновесным излучением. При этом состояние излучающего тела может быть охарактеризовано определенной постоянной температурой.

Основной количественной характеристикой теплового излучения является его энергетическая светимость R_T т.е. лучистая энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени со всеми длинами волн при заданной температуре T . Доля энергетической светимости, приходящаяся на интервал длин волн $d\lambda$, может быть представлена в виде

$$dR_{\lambda,T} = r_{\lambda,T} \cdot d\lambda. \quad (1)$$

Тогда энергетическая светимость будет равна

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (2)$$

Величина $r_{\lambda,T}$ определяет спектральную характеристику теплового излучения произвольного твердого тела и называется испускательной способностью.

Наряду с испускательной способностью каждое тело характеризуется определенной поглотительной способностью $a_{\lambda,T}$. Тело, полностью поглощающее все падающее на него излучение, называется абсолютно черным телом. Согласно теореме Кирхгофа, отношение лучеиспускательной и поглотительной способностей для любых тел при одинаковой их температуре T и для одной и той же длины волны λ одинаковы и не зависит от природы этих тел. Это отношение является универсальной функцией длины волны и температуры и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела.

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T}, \quad (3)$$

где $E_{\lambda,T}$ - лучеиспускательная способность абсолютно черного тела.

Спектр испускаемого излучения является непрерывным и охватывает широкую область частот; это объясняется большим числом степеней свободы частиц, образующих такие среды, их тепловым движением и силами взаимодействия между ними. Следовательно, для теоретического изучения теплового излучения необходимо применять статистические методы.

Законы статистической механики позволяют определить среднюю энергию, приходящуюся на один гармонический осциллятор в случае теплового равновесия. Энергия n -го осциллятора ε_n кратна некоторому значению ε_0 :

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 \cdot n, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Если система состоит из N объектов, то при тепловом равновесии в

среднем $N_n = N \frac{e^{-\frac{\varepsilon_0}{kT}}}{\sum_n e^{-\frac{\varepsilon_0}{kT}}}$ объектов имеют энергию ε_n . Полная энергия системы

$$E = N \frac{\sum_n \varepsilon_n e^{-\frac{\varepsilon_n}{kT}}}{\sum_n e^{-\frac{\varepsilon_n}{kT}}}. \text{ Средняя же энергия, приходящаяся на один объект, равна}$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{E}{N} = \frac{\sum_n \varepsilon_n e^{-\frac{\varepsilon_n}{kT}}}{\sum_n e^{-\frac{\varepsilon_n}{kT}}}. \quad (5)$$

При подстановке (4) в выражение (5) дальнейший расчет сведется к суммированию бесконечной геометрической прогрессии, в результате чего получим

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{\varepsilon_0}{kT}} - 1}. \quad (6)$$

Макс Планк, исходя из экспериментального распределения пришел к выводу, что $\varepsilon_0 \neq \kappa T$, а нужно принять $\varepsilon_0 = h\nu$, где ν может иметь произвольные значения, а h является универсальным постоянным коэффициентом, определяемым из опыта. Тогда средняя энергия осциллятора

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (7)$$

Пользуясь этим результатом для спектральной плотности энергии, получаем

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{или} \quad u^*(\lambda, T) = \frac{8\pi h}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (8)$$

Эти выражения представляют собой закон распределения Планка объемной плотности энергий соответственно по частотам и по длинам волн

$$U(T) = \int_0^\infty u(\nu, T) d\nu = \int_0^\infty u^*(\lambda, T) d\lambda = \frac{8\pi^5 k^4}{15h^3 c^3} \cdot T^4.$$

Более доступна экспериментальным исследованиям полная энергия, излучаемая одной стороной единичной поверхности в единицу времени \dot{W}_s :

$$\dot{W}_s = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^3} \cdot T^4,$$

или учитывая, что $\frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^3} = \sigma = 5,66961(96) \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ - постоянная Стефана - Больцмана, получим закон излучения абсолютно черного тела - закон Стефана - Больцмана

$$\dot{W}_s = \sigma T^4. \quad (9)$$

Для реальных (серых) тел

$$\dot{W}_s = \alpha \sigma T^4, \quad (10)$$

где $\alpha < 1$. Например, коэффициент серости для вольфрама $\alpha = 0,46$ при $T = 3000 \text{ К}$ для $\lambda = 0,66 \text{ мкм}$.

Длина волны λ_m , соответствующая максимуму распределения энергии в спектре излучения, определяется условием $\frac{dU}{d\lambda} = 0$, которое приводит к закону смещения Вина

$$\lambda_m \cdot T = b,$$

где $b = \frac{hc}{k} \cdot \frac{1}{4,965} = 2,89782 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная Вина.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Оптический пирометр с исчезающей нитью.
2. Источники питания.
3. Вольтметр, амперметр, микроамперметр, реостат.
4. Лампа с вольфрамовой нитью накаливания.
5. Набор светофильтров.
6. Фотоэлемент.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

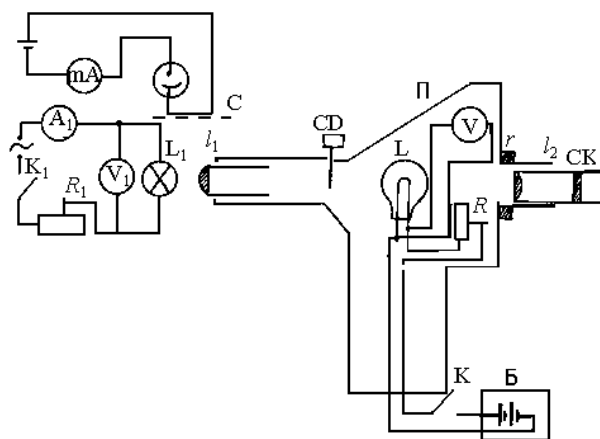


Рисунок 1

Мощность, потребляемую лампой накаливания L_1 регулируют реостатом R_1 и измеряют амперметром A_1 и вольтметром V_1 . Световой поток от лампы L_1 , узкий спектральный состав которого выделяют при помощи светофильтра C , измеряют фотоэлементом ФЭ. Температуру нити лампы накаливания L_1 измеряют пирометром с исчезающей нитью. Пирометр состоит из зрительной трубы Π , внутри которой находится лампа L . Линза объектива l_1 проектирует изображение излучающего тела в плоскость расположения нити лампы пирометра L . Изображение и нить лампы пирометра рассматриваются наблюдателем через окуляр, в котором находятся линза l_2 и красный светофильтр СК. Он выделяет из спектров обеих ламп излучение с длиной волны 660 нм. Ток накала нити лампы пирометра регулируется реостатом R посредством рифленного кольца в передней части трубы пирометра.

Добившись того, что нить лампы пирометра «исчезает» на фоне нити исследуемой лампы, снимают отсчет по шкале пирометра. У пирометра две шкалы: для диапазонов температур от 700 °С до 1400 °С и от 1200 °С до 2000 °С. Во втором случае на пути лучей вводится дымчатый светофильтр СД.

Пирометр регистрирует температуру тела, при которой яркость нити его лампы для определенной длины волны равна яркости черного тела для той же длины волны. Такая температура называется яркостной. Так как любое тело излучает меньше энергии, чем абсолютно черное тело при той же температуре, то его термодинамическая температура выше яркостной:

$$T_{\text{терм}} = T_{\text{ярк}} + \Delta T, \quad (11)$$

где

$$\Delta T = \frac{\lambda \cdot T_{\text{ярк}}^2 \ln \alpha(\lambda, T)}{C_1}. \quad (10)$$

Здесь $\alpha(\lambda, T) = 0,46$ для вольфрама при $\lambda = 660$ нм, $C_1 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Упражнение 1

Определение постоянной Стефана - Больцмана

1. Включить электрическую цепь лампы накаливания L_1 и, меняя реостатом R_1 силу тока, добиться начала свечения лампы.
2. Зафиксировать показания амперметра A_1 , вольтметра V_1 и микроамперметра μA при синем и красном светофильтрах C перед фотоэлементом ФЭ.
3. При помощи пирометра измерить температуру нити лампы накаливания.
4. Данные занести в табл. 1 и 2.
5. Опыты повторить несколько раз, меняя значение U .
6. Вычислить значения σ , произвести статистическую обработку экспериментальных данных и определить абсолютную и относительную погрешности. $S' = \alpha S$, где S - площадь поверхности нити накала лампы.
7. Сделать выводы по работе.
8. Результаты записать в виде: $\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \langle \Delta \sigma \rangle$.

Т а б л и ц а 1

№	$S, \text{ м}^2$	I, A	$U, \text{ В}$	$T_{\text{нити}}, \text{ К}$	$T_{\text{комнат}}, \text{ К}$	$\sigma \cdot 10^{-8}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$\langle \sigma \rangle 10^{-8}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$\Delta \sigma \cdot 10^{-8}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$\varepsilon, \%$
1	$0,5 \cdot 10^{-4}$		7						
2			9						
3			10						
4			11						

Упражнение 2

Качественная проверка закона излучения Кирхгофа и закона смещения Вина

В равновесном состоянии вся электрическая мощность, подводимая к нити накаливания, излучается: $\frac{IU}{S} = \alpha \sigma T_{\text{ярк}}^4$, откуда

$$\frac{IU}{S \sigma T_{\text{ярк}}^4} = \alpha < 1. \quad (11)$$

Выполнение этого неравенства подтверждает закон Кирхгофа.

По закону смещения Вина максимум энергии в спектре излучения с повышением температуры смещается в область более коротких длин волн, по-

этому отношение интенсивностей монохроматических излучений в синей и красной частях света должно возрасти с повышением температуры.

Световой поток от лампы L_1 попадает на фотоэлемент ФЭ через светофильтр C . В цепи фотоэлемента возникает фототок, величина которого пропорциональна интенсивности падающего света. Поэтому отношение интенсивностей можно заменить отношением фототоков, измеряемых микроамперметром μA , соответственно при синем и красном светофильтрах перед фотоэлементом

$$\frac{I_c(T)}{I_k(T)} = \varphi(T). \quad (12)$$

Для проверки рассматриваемых законов теплового излучения необходимо сделать следующее:

1. Заполнить табл. 2.
2. Вычислить значения α неравенства (11).
3. Вычислить значения $\varphi(T)$.
4. Построить график функции $\varphi(T)$.
5. Построить график зависимости расходуемой мощности от термодинамической температуры нити лампы L_1 .
6. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2

№	$T_{\text{ярк}}, K$	I, A	U, B	$I \cdot U, Bt$	$\alpha = \frac{IU}{S \sigma T^4}$	$I_c, \mu A$	$I_k, \mu A$	$\varphi(T)$

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое излучение называют тепловым?
2. Какое излучение называют равновесным тепловым излучением?
3. Сформулируйте законы Кирхгофа, Стефана - Больцмана и смещения Вина.
4. Запишите формулу Планка для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела и получите из нее законы Стефана - Больцмана и смещения Вина.
5. Охарактеризуйте устройство и принцип действия оптического пирометра с исчезающей нитью.
6. Что называют яркостной температурой и почему она отличается от термодинамической температуры источника света?
7. Чем обусловлена граница температур, измеряемых оптическим пирометром с исчезающей нитью?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 35

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ВОЛЬФРАМА ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомление с основными законами теплового излучения.
2. Определение коэффициента черноты вольфрамовой лампы накаливания.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. - М.: Наука, 1980. - 752 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
4. Бухман С.В., Головинский П.А., Иржавский Н.И., Шестаков О.А. Практикум по физике для фронтального выполнения с элементами программирования: учеб. пособие. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1989. - 152 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1 Тепловое излучение и его характеристики

Тела, нагретые до достаточно высоких температур, способны излучать электромагнитные волны. Свечение тел, связанное с нагреванием получило название теплового излучения. Это излучение является самым распространенным в природе. Тепловое излучение может быть равновесным, т.е. может находиться в состоянии термодинамического равновесия с веществом в замкнутой (теплоизолированной) системе. Количественной спектральной характеристикой теплового излучения служит спектральная плотность энергетической светимости (излучательная способность):

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW_{\lambda,\lambda+d\lambda}^{uzl}}{d\lambda}, \quad (1)$$

где $r_{\lambda,T}$ - спектральная плотность энергетической светимости; $dW_{\lambda,\lambda+d\lambda}^{uzl}$ - энергия электромагнитного излучения, испускаемая за единицу времени с единицы площади поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$;

Характеристикой полной мощности теплового излучения с единицы площади поверхности тела во всем интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ служит энергетическая светимость R_T (интегральная энергетическая светимость):

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (2)$$

3.2. Формула планка и законы тепловое излучение черного тела

Закон Стефана - Больцмана

В 1900 г. Планк выдвинул гипотезу, согласно которой атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно, а порциями - квантами. В соответствие с гипотезой Планка спектральная плотность энергетической светимости определяется следующей формулой

$$r_{\lambda,T} = 2\pi hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (3)$$

Из формулы Планка можно получить выражение для энергетической светимости. Подставим значение спектральной плотности энергетической светимости тела из формулы (3) в выражение (2):

$$R_T = \int_0^\infty 2\pi hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda = 2\pi hc^2 \int_0^\infty \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda. \quad (4)$$

Для вычисления интеграла (4) введем новую переменную $x = \frac{hc}{\lambda kT}$. Отсюда $\lambda = \frac{hc}{kTx}$; $d\lambda = -\frac{hc}{kTx^2} dx$. Формула (4) при этом преобразуется к виду

$$R_T = 2\pi hc^2 \int_\infty^0 \frac{k^5 T^5 x^5}{h^5 c^5 (e^x - 1)} * \frac{-hc}{kTx^2} dx = \frac{2\pi k^4 T^4}{h^3 c^2} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx. \quad (5)$$

Так как $\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$, то выражение (5) для энергетической светимости будет иметь следующий вид:

$$R_T = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4. \quad (6)$$

Соотношение (6) представляет собой закон Стефана - Больцмана, где постоянная Стефана - Больцмана $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,67 * 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4\text{)}$. Отсюда вытекает определение закона Стефана - Больцмана:

Энергетическая светимость абсолютно черного тела прямо-пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

В теории теплового излучения наряду с моделью черного тела часто пользуются понятием серого тела. Тело называется серым, если его коэффициент поглощения одинаков для всех длин волн и зависит только от температуры и состояния поверхности. Для серого тела закон Стефана - Больцмана имеет вид

$$R_T = k\sigma T^4, \quad (7)$$

где k - коэффициент излучения теплового излучателя (коэффициент черноты).

Первый закон Вина (закон смещения Вина)

Исследуем соотношение (3) на экстремум. Для этого определим первую производную от спектральной плотности по длине волны и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dr_{\lambda,T}}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^6 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \left(\frac{hc}{\lambda kT} e^{hc/\lambda kT} - 5 \right) = 0. \quad (8)$$

Введем переменную $x = \frac{hc}{\lambda kT}$. Тогда из уравнения (8) получим

$$xe^x - 5(e^x - 1) = 0. \quad (9)$$

Трансцендентное уравнение (9) в общем случае решается методом последовательных приближений. Так как для реальных температур $e^x \gg 1$, то можно найти более простое решение уравнения (9). Действительно, при этом условии соотношение (9) упрощается и принимает вид

$$xe^x - 5e^x = 0,$$

которое имеет решение при $x = 5$. Следовательно,

$$\frac{hc}{\lambda_m kT} = 5.$$

Отсюда

$$\lambda_m = \frac{hc}{5kT}.$$

Более точное решение уравнения (9) методом последовательных приближений приводит к следующей зависимости:

$$\lambda_m = \frac{hc}{4,965kT} = \frac{b_1}{T}, \quad (10)$$

где $b_1 = \frac{hc}{4,965k} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ мК}$.

Из соотношения (10) вытекает определение первого закона Вина (закона смещения Вина).

Длина волны λ_m , соответствующая максимальной спектральной плотности энергетической светимости обратнопропорциональна температуре тела.

Величина b_1 получила название постоянной закона смещения Вина.

Второй закон Вина

Подставим значение λ_m из уравнения (10) в выражение спектральной плотности энергетической светимости (3). Тогда получим максимальную спектральную плотность:

$$r_{max} = 2\pi\hbar c^2 \frac{\left(\frac{b_1}{T}\right)^{-5}}{\frac{hc}{e^{\frac{b_1}{kT}} - 1}} = \frac{2\pi\hbar c^2}{b_1^5 \left(e^{\frac{hc}{kb_1}} - 1\right)} * T^5 = b_2 T^5, \quad (11)$$

где $b_2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{b_1^5 \left(e^{\frac{hc}{kb_1}} - 1\right)} = 1,29 * 10^{-5} \text{ Вт/м}^2\text{К}^5$.

Из соотношения (11) вытекает определение второго закона Вина.

Максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела прямопропорциональна пятой степени абсолютной температуры.

Величина b_2 получила название постоянной второго закона Вина.

На рис. 1 представлена зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны для некоторого тела при двух различных температурах. С повышением температуры площадь под кривыми спектральной плотности должна увеличиваться пропорционально четвертой степени температуры в соответствии с законом Стефана - Больцмана, длина волны, соответствующая максимальной спектральной плотности уменьшаться обратнопропорционально температуре согласно закону смещения Вина и максимальное значение спектральной плотности увеличиваться прямопропорционально пятой степени абсолютной температуры в соответствии со вторым законом Вина.

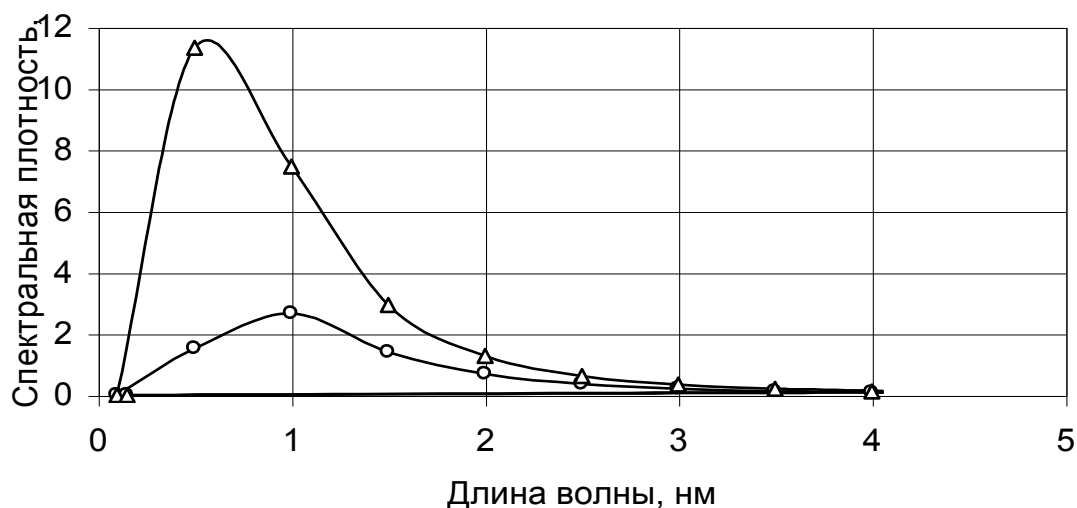


Рисунок 1

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе в качестве излучающего тела используется нить накала электрических ламп различной мощности (25, 60, 75 и 100 Вт). Для опреде-

ления температуры нити накаливания электрических лампочек снимается вольт-амперная характеристика, по которой определяется величина статического сопротивления ($R = V/I$) нити накаливания и рассчитывается ее температура. На рис. 2 представлена типичная вольт-амперная характеристика лампы накаливания. Видно, что при малых значениях тока ток линейно зависит от приложенного напряжения, и соответствующая прямая проходит через начало координат. При дальнейшем увеличении тока нить накала разогревается, сопротивление лампы увеличивается и наблюдается отклонение вольт-амперной характеристики от линейной зависимости, проходящей через начало координат. Для поддержания тока при большем сопротивлении требуется большее напряжение. Дифференциальное сопротивление лампы $R_o = dV/dI$ монотонно уменьшается, а затем принимает почти постоянное значение и вольт-амперная характеристика в целом носит нелинейный характер. Считая, что потребляемая электрической лампой мощность $P = IV$ отводится излучением, можно определить коэффициент черноты k нити накаливания лампы или оценить постоянную Стефана - Больцмана по формуле

$$IV = k\sigma(T^4 - T_k^4)S, \quad (12)$$

где S - площадь нити накаливания лампы; k - степень черноты; σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Из формулы (12) можно определить коэффициент черноты нити накаливания электрической лампы.

$$k = IV / \sigma(T^4 - T_k^4)S. \quad (13)$$

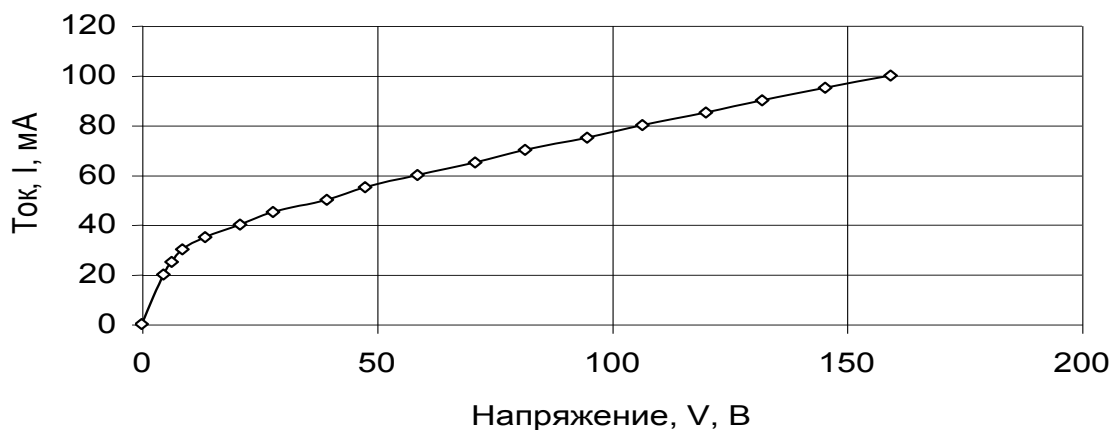


Рисунок 2

На рис. 3 представлена электрическая схема установки для снятия вольт-амперной характеристики лампы, определения сопротивления нити, её температуры и изучения законов теплового излучения. Ключи K_1 и K_2 предназначены для подключения электроизмерительных приборов с необходимыми пределами измерения тока и напряжения.

Переменное сопротивление R подключается в цепь переменного тока с напряжением сети 220 В по потенциометрической схеме, обеспечивающей плавное изменение напряжения от 0 до 220 В.

Определение температуры нити накаливания основано на известной зависимости сопротивления металлов от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (14)$$

где R_0 - сопротивление нити накаливания при 0°C ; α - температурный коэффициент сопротивления вольфрама, $\alpha = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град.}$

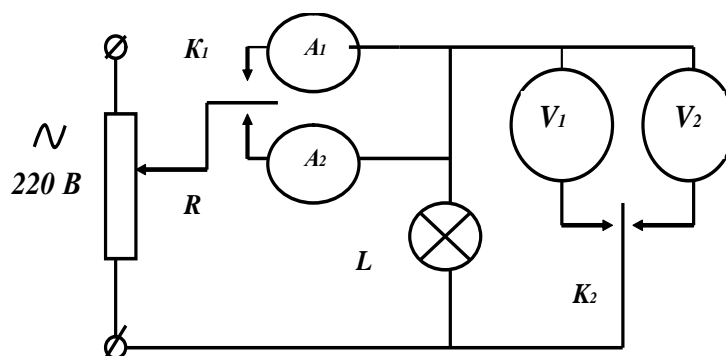


Рисунок 3

Запишем выражение (14) для комнатной температуры:

$$R_k = R_0(1 + \alpha t_k). \quad (15)$$

Разделив почленно выражение (14) на (15), получим

$$\frac{R}{R_k} = \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t_k}. \quad (16)$$

Отсюда определим температуру нити накаливания:

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R(1 + \alpha t_k)}{R_k} - 1 \right). \quad (17)$$

Таким образом, зная статическое сопротивление R_k нити накаливания в отсутствии тока при комнатной температуре t_k и сопротивление R нити при протекании тока можно определить температуру нити. При выполнении работы сопротивление R_k при комнатной температуре измеряется цифровым электроизмерительным прибором (тестером), а статическое сопротивление R нити накаливания рассчитывается по закону Ома

$$R = \frac{V}{I}. \quad (18)$$

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выкрутите лампу накаливания из патрона и с помощью цифрового электроизмерительного прибора определите сопротивление нити испытываемой электрической лампы при комнатной температуре. Результаты измерений запишите в табл. 1.

2. Вверните лампу в патрон, снимите вольт-амперную характеристику лампы (зависимость силы тока от напряжения). Силу тока измеряйте через каждые 5 мА после непродолжительной выдержки в течение 2 - 5 мин. Результаты измерений запишите в табл. 1.

3. Рассчитайте по формуле (18) и (17) сопротивление и температуру нити в $^{\circ}\text{C}$ и K .

4. Рассчитайте по формуле (13) коэффициент черноты нити накаливания. Результаты расчет запишите в табл. 1.

Экспериментальные данные для расчета коэффициента черноты.

Т а б л и ц а 1

№	I, мА	V, В	P, Вт	R, Ом	t, $^{\circ}\text{C}$	T, К	S, м^2	k
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0					
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

5. По данным табл. 1 постройте вольтамперную характеристику лампы, зависимости сопротивления и коэффициента черноты от температуры и мощности.

6. Определите для исследуемого температурного интервала среднее значение коэффициента черноты, величину абсолютной и относительной погрешности. Окончательные результаты представьте в виде: $\langle k \rangle \pm \langle \Delta k \rangle$,

$\varepsilon = \frac{\langle \Delta k \rangle}{\langle k \rangle} 100\%$. Данные расчетов запишите в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

№	k	$\langle k \rangle$	Δk_i	Δk_i^2	ΔS	$\langle \Delta k \rangle$	$\varepsilon, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							

7. Повторите измерения для других ламп накаливания с мощностью 40, 60, и 75 Вт.

8. Сделайте краткие выводы по работе. Результаты расчета коэффициента черноты и определение погрешности измерений.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Поясните гипотезу и формулу Планка, докажите закон Стефана - Больцмана, первый и второй законы Вина.

2. Объясните методику определения степени черноты нити накаливания электрической лампы.

3. Дайте определения энергетической светимости, спектральной плотности энергетической светимости, коэффициента черноты, КПД лампы.

4. Изобразите примерный спектр излучения абсолютно черного тела и поясните закономерности изменения спектра при изменении температуры тела.

5. Поясните нелинейные свойства вольтамперной характеристики лампы накаливания.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 36

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА В ОПЫТЕ ЮНГА И С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определение длины волны света в опыте Юнга.
2. Определение расстояний между мнимыми источниками света в опыте с бипризмой Френеля.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. - М.: Наука, 1982. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 542 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976. - 982 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Когерентные или частично когерентные пучки света можно получить двумя способами: делением *фронта световой волны* и *делением светового пучка по амплитуде*. В настоящей работе рассматриваются две интерференционные схемы, относящиеся к первому способу.

Опыт Юнга. Согласно опыту Юнга источником света служит ярко освещенная щель S , от которой световая волна падает на две узкие щели S_1 и S_2 , освещаемые, таким образом, различными участками одного и того же волнового фронта. Световые пучки, проходящие через малые отверстия S_1 и S_2 , расширяются в результате дифракции и частично перекрываются, создавая интерференционную картину (рис. 1).

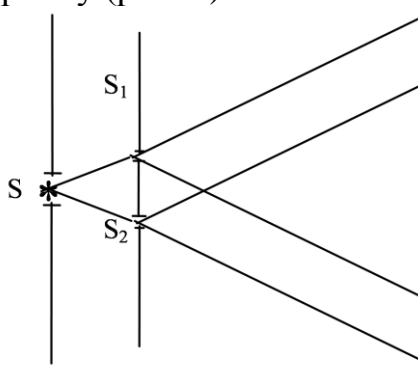


Рисунок 1

Щели S_1 и S_2 (рис. 2) находятся на расстоянии d друг от друга и являются когерентными источниками света. Интерференция наблюдается в произвольной точке A экрана, расположенного параллельно обоим щелям на расстоянии l от них, причем $l \gg d$.

Начало отсчета выбрано в точке O , симметричной относительно щелей. Интенсивность в любой точке A экрана, лежащей на расстоянии x от O , определяется оптической разностью хода $\Delta = s_2 - s_1$. Из рис. 2 следует

$$s_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2; \quad s_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2$$

откуда

$$s_2^2 - s_1^2 = 2xd$$

или

$$\Delta = s_2 - s_1 = 2xd / (s_1 + s_2).$$

Учитывая, что $l \gg d$, и $s_1 + s_2 \sim 2l$ получаем:

$$\Delta = xd/l. \quad (1)$$

Тогда максимумы интенсивности интерференции света будут наблюдаться при

$$x_{\max} = m \frac{l}{d} \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots), \quad (2)$$

а минимумы соответствовать условию

$$x_{\min} = (m + \frac{1}{2}) \frac{l}{d} \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots). \quad (3)$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами), называемое *шириной интерференционной полосы*, равно

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda. \quad (4)$$

Δx не зависит от порядка интерференции (величины m) и является постоянной величиной при заданных l , d и λ . Используя полученное выражение для ширины интерференционной полосы, при известных величинах Δx , l , d можно рассчитать длину световой волны:

$$\lambda = \frac{d\Delta x}{l}. \quad (5)$$

Бипризма Френеля. Интерференционная картина получаемая с помощью бипризмы Френеля возникает в результате преломления света в бипризме, при наложении когерентных волн от мнимых источников S_1 и S_2 (рис. 3).

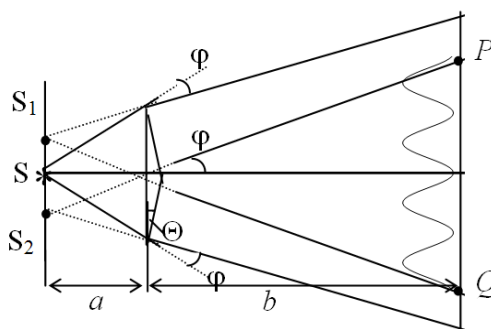


Рисунок 3

Параллельно общей грани бипризмы, на расстоянии a от нее, располагается источник света S . Можно показать, что в случае, когда преломляющий луч Δ мал и углы падения лучей на грань призмы не очень велики, все лучи отклоняются призмой практически на одинаковый угол, равный

$$\varphi = (n - 1)\theta \quad (6)$$

(n - показатель преломления призмы). Угол падения лучей на бипризму невелик, поэтому все лучи отклоняются каждой из половин бипризмы на одинаковый угол. В результате образуются две когерентные цилиндрические волны, исходящие из мнимых источников S_1 и S_2 , лежащих в одной плоскости с источником света S .

В данном эксперименте расстояние между источниками равно

$$d = 2a \sin \varphi \sim 2a\varphi = 2a(n - 1)\theta, \quad (7)$$

а расстояние от источников до экрана

$$l = a + b.$$

Тогда, используя формулу (4), найдем ширину интерференционной полосы следующим образом:

$$\Delta x = \frac{a + b}{2a(n - 1)\theta} \lambda. \quad (8)$$

Область перекрытия волн PQ в таком эксперименте имеет протяженность

$$2btg\varphi \sim 2b\varphi = 2b(n - 1)\theta \quad (9)$$

и максимальное число наблюдаемых интерференционных полос можно определить по следующей формуле:

$$N = \frac{4ab(n - 1)^2 \theta^2}{\lambda(a + b)}. \quad (10)$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Оптическая скамья.
2. Лазер.
3. Линза
4. Щели Юнга.
5. Бипризма Френеля.
6. Экран для наблюдения.

5. РАБОТА С ЛАЗЕРОМ

Во время работы с лазером необходимо помнить, что попадание в глаза прямого лазерного излучения опасно для зрения. Категорически запрещается смотреть на прямой лазерный луч! Включать лазер можно только под контролем преподавателя или лаборанта.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1

Определение длины волны в опыте Юнга

1.1. Собрать оптическую схему, представленную на рис. 4, а. Включить лазер. Ввести в лазерный пучок собирающую линзу. Установить щели Юнга (рис. 4, б) в лазерный пучок и получить интерференционную картину на экране.

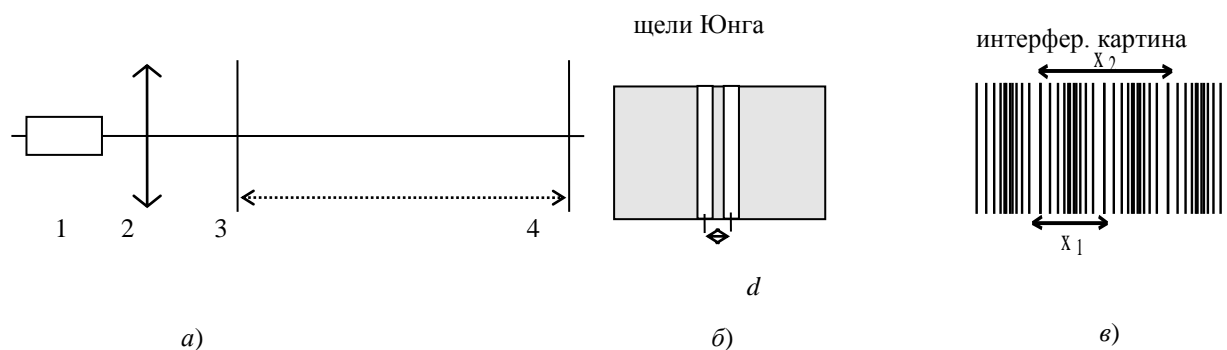


Рисунок 4.

1. Лазер; 2. Собирающая линза; 3. Щели Юнга; 4. Экран

1.2. Измерить линейкой расстояние l между щелями и экраном.

1.3. Измерить ширину интерференционной полосы x_1 (расстояние между соседними максимумами). Повторив измерения несколько раз найти среднее значение ширины полосы: $\langle \Delta x \rangle$:

$$\langle \Delta x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_n.$$

1.4. Используя выражение для ширины интерференционных полос (4), рассчитать длину волны лазерного излучения

$$\langle \lambda \rangle = \frac{d \langle \Delta x \rangle}{l}.$$

Данные занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

l , м	$\langle \Delta x \rangle$, м	d , м	λ , м
		$0,1 \cdot 10^{-3}$	

1.5. Вычислить относительную погрешность длины волны $\frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle}$

$$\frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \langle \Delta x \rangle}{\langle \Delta x \rangle} + \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle} 100\%.$$

$$\Delta d = 0.005 \text{ мм}, \quad \Delta \langle \Delta x \rangle = \Delta l = 0.5 \text{ мм}.$$

Найти абсолютную погрешность $\Delta \lambda = \langle \lambda \rangle \cdot \varepsilon$. Результат записать в виде $\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta \lambda$.

Найденные значения $\frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle}$ и Δd будут использоваться в упражнении

2.

Упражнение 2

*Определение расстояния между мнимыми источниками света
в опыте с бипризмой Френеля*

2.1. Собрать оптическую схему, изображенную на рис. 5. Включить лазер. Ввести в лазерный пучок собирающую линзу. Установить бипризму Френеля в лазерный пучок и разместить экран для наблюдения на максимально возможном расстоянии, получить интерференционную картину.

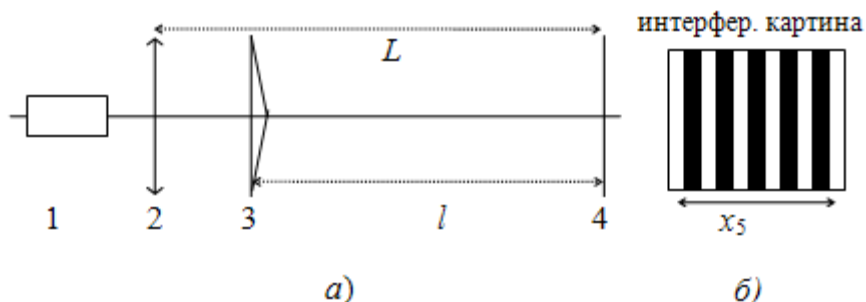


Рисунок 5.

1. Лазер; 2. Собирающая линза; 3. Бипризма Френеля; 4. Экран для наблюдения

2.2. Измерить линейкой расстояние l между плоскостью основания призмы и экраном, а также расстояние L от экрана до линзы (рис. 5).

2.3. Измерить расстояния x_n между несколькими интерференционными полосами и найти среднее значение ширины полосы $\langle \Delta x \rangle$ (например, для пяти полос $\langle \Delta x \rangle = \frac{x_5}{5}$ рис. 5):

$$\langle \Delta x \rangle = \frac{x_n}{n}.$$

2.4. Определить расстояние между мнимыми источниками света, используя выражение для ширины интерференционной полосы (4)

$$\langle d \rangle = \frac{L - F}{\langle \Delta x \rangle} \lambda.$$

Данные занести в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

λ , м	l , м	L , м	$\langle \Delta x \rangle$, м	$\langle d \rangle$, м	F , м	θ , рад	n
					$5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	

2.5. Вычислить относительную погрешность по формуле

$$\frac{\Delta d}{\langle d \rangle} = \frac{\Delta L}{L - F} + \frac{\Delta F}{L - F} + \frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle} + \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} 100\%.$$

$$\Delta L = \Delta l = \Delta x = \Delta a = 0.5 \text{ мм}, \quad \Delta F = 0.2 \text{ мм}.$$

Найти абсолютную погрешность по формуле $\Delta d = \langle d \rangle \cdot \varepsilon$.

Окончательный результат записать в виде $d = \langle d \rangle \pm \Delta d$.

Упражнение 3

Определение показателя преломления материала бипризмы Френеля

3.1. По данным табл. 2, используя выражение (8), рассчитать величину показателя преломления n бипризмы

$$\langle n \rangle = \frac{(a+b)\langle \lambda \rangle}{2a\Delta x\theta} + 1 = \frac{(L-F)\langle \lambda \rangle}{2(L-b-F)\Delta x\theta} + 1.$$

Полученный результат занести в табл. 2.

3.2. Рассчитать относительную и абсолютную погрешность измерения по следующим формулам, учитывая, что

$$a + b = l,$$

$$\frac{\Delta n}{\langle n \rangle} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \langle \Delta x \rangle}{\langle \Delta x \rangle} + \frac{\Delta \theta}{\theta}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta n}{n} 100\%.$$

$$\Delta n = \langle n \rangle \cdot \varepsilon$$

3.3. Окончательный результат записать в виде $n = \langle n \rangle \pm \Delta n$.

3.4. Сделать выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение пространственной и временной когерентности электромагнитных волн.
2. Приведите примеры схем наблюдения интерференции света.
3. Рассчитайте интерференционную картину от двух точечных когерентных источников света.
4. Выведите формулу для определения длины волны света, в опыте Юнга.
5. Выведите формулы для показателя преломления материала бипризмы и нахождения расстояния между мнимыми источниками света в опыте с бипризмой Френеля.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 37

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментально исследовать действие магнитного поля на движущийся заряд.
2. Изучить действие силы Лоренца на движущийся заряд.
3. Определить удельный заряд частицы.
4. Определить параметры траектории движения.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. - В 3 т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. - 480 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

Как известно, на частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца $F = q[\vec{V} \times \vec{B}]$. Поэтому заряженная частица, влетающая в магнитное поле, отклоняется от своего первоначального направления движения (изменяет траекторию), если только это направление не совпадает с направлением поля. В последнем случае магнитное поле вообще не действует на движущуюся частицу.

Рассмотрим случай, когда частица влетает в однородное поле, созданное в вакууме, имея направление, перпендикулярное полю.

Пусть частица влетает в магнитное поле с индукцией B (рис. 1). Линии магнитной индукции, изображенные точками, направлены перпендикулярно плоскости рисунка.

Так как скорость перпендикулярна силе Лоренца, то изменяется только направление скорости движения частицы, при этом значение модуля скорости не меняется. Отсюда следует, что траектория частицы является окружностью, на которой частицу удерживает лоренцова сила, играющая роль центростремительной силы. Радиус окружности определим, приравняв лоренцову и центростремительную силы:

$$qvB = mv^2/r, \quad (1)$$

откуда

$$r = mv/qB. \quad (2)$$

Таким образом, радиус окружности, по которой движется частица, пропорционален скорости частицы и обратно пропорционален магнитной индукции поля.

Период обращения частицы равен отношению длины окружности к скорости частицы:

$$T = 2\pi r/v. \quad (3)$$

Откуда

$$T = 2\pi m/qB. \quad (4)$$

Следовательно, период вращения частицы в магнитном поле не зависит от ее скорости.

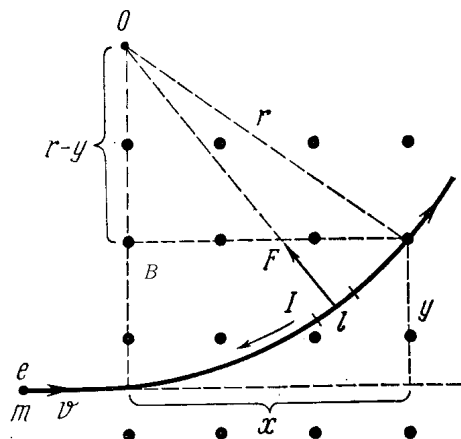


Рисунок 1. Движение заряженной частицы в магнитном поле

Если заряженная частица влетает в магнитное поле под углом α , то дальнейшее движение частицы представит собой геометрическую сумму двух одновременных движений: вращения по окружности со скоростью $v \sin \alpha$ в плоскости, перпендикулярной линиям напряженности, и перемещения вдоль поля со скоростью $v \cos \alpha$ (рис. 2).

Очевидно, что результирующая траектория частицы окажется винтовой линией с шагом спирали:

$$h = T v_z. \quad (5)$$

С помощью рассмотренных закономерностей движения заряженных частиц в магнитном поле можно экспериментально определить удельный заряд частицы:

$$\frac{q}{m} = \frac{2\pi}{T \cdot B}. \quad (6)$$

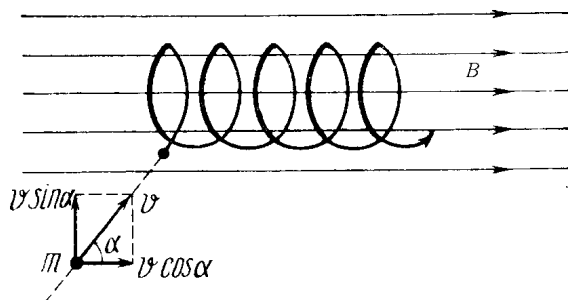


Рисунок 2. Движение заряженной частицы под углом к магнитному полю

3.2. Компьютерный эксперимент

Компьютерный эксперимент дает возможность, изменяя характеристики движения заряда и индукции магнитного поля, определить радиус винтовой или круговой траектории заряда и определять время движения. Измерив период движения заряда, определяют искомый удельный заряд частицы, которая движется, и шаг винта.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1» ООО «Физикон».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите программу «Открытая физика 1.1» на компьютер.
2. Запустите установленную программу, в разделе – «Содержание», откройте вкладку «Электричество и магнетизм», выберите компьютерную модель – «Движение заряда в магнитном поле», рис. 3.

5.1. Изучение действия силы Лоренца на частицу, влетающую перпендикулярно магнитному полю

- 1.1. Установите скорость частицы. Для этого нажмите на клавишу «Выбор». Затем подведите курсор к бегунку шкалы v_x , нажмите левую клавишу мышки и двигайте шкалу до нужного положения. Аналогично установите $v_z = 0$ м/с.
- 1.2. Установите значение индукции ($B > 0$) магнитного поля.
- 1.3. Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после двух-трех оборотов. Запишите значение радиуса окружности.
- 1.4. Исследуйте зависимость r от B . Для этого для трех значений скоростей меняйте значение магнитной индукции. Все значения занесите в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

		$v_{x1}, \text{ м/с} =$	$v_{x2}, \text{ м/с} =$	$v_{x3}, \text{ м/с} =$
$B, \text{ мТл}$		$r_1, \text{ м}$	$r_2, \text{ м}$	$r_3, \text{ м}$
1				
2				
3				
4				
5				

- 1.5. Исследуйте зависимость r от v_x . Для этого для трех значений магнитной индукции меняйте значение скоростей. Все значения занесите в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

$v_x, \text{ м/с}$		$B_1, \text{ мТл} =$	$B_2, \text{ мТл} =$	$B_3, \text{ мТл} =$
		$r_1, \text{ м}$	$r_2, \text{ м}$	$r_3, \text{ м}$
1				
2				
3				
4				
5				

1.6. Постройте графики зависимостей r от B (по данным табл. 1) и r от v_x (по данным табл. 2).

1.7. Рассчитайте удельный заряд частицы по формуле (6). Для этого установите любое значение магнитной индукции $B > 0$ поля и любое значение скорости v_x . Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после одного оборота. Запишите значение периода (время одного оборота частицы).

1.8. Зарисуйте траекторию движения частицы.

5.2. Изучение действия силы Лоренца на частицу, влетающую под углом к магнитному полю

2.1. Установите скорость частицы. Для этого подведите курсор к клавише «Выбор» и нажмите кнопкой мышки. Затем подведите курсор к бегунку шкалы v_x , нажмите левую клавишу мышки и двигайте шкалу до нужного положения. Аналогично установите v_z .

2.2. Установите значение индукции ($B > 0$) магнитного поля.

2.3. Исследуйте зависимость шага спирали от значения v_z . Для этого для трех значений магнитной индукции меняйте значения v_z (при неизменном значении скорости v_x). Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после двух-трех витков спирали. Рассчитайте и запишите значение периода вращения (время одного оборота). Значение шага спирали h рассчитайте по формуле (5). Запишите все значения в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

$v_x, \text{ м/с} =$	$B_1, \text{ мТл} =$		$B_2, \text{ мТл} =$		$B_3, \text{ мТл} =$	
$v_z, \text{ м/с}$	$T, \text{ с}$	$h, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$h, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$h, \text{ м}$

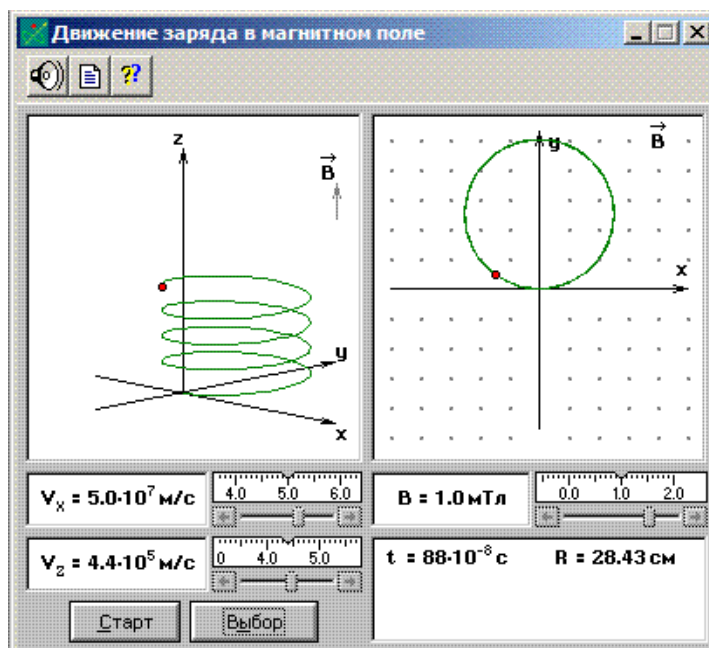


Рисунок 3 - Движение заряда влетающего под углом к магнитному полю

2.4. Постройте график зависимости шага спирали h от значения v_z по данным табл. 3.

2.5. Рассчитайте удельный заряд частицы по формуле (6). Для этого установите любое значение магнитной индукции $B > 0$ поля и любое значение скорости v_x и v_z . Нажмите клавишей мышки на клавише «Старт» и повторным нажатием остановите процесс после одного оборота. Запишите значение периода (время одного оборота частицы).

2.6. Зарисуйте траекторию движения частицы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите выражение для силы Лоренца в векторной и скалярной форме.
2. Опишите поведение заряженной частицы в магнитном поле.
3. От чего зависит вид траектории протона, при движении в магнитном поле.
4. Выведите формулы для параметров траектории частицы.
5. Электрон движется в магнитном поле по окружности. Как зависит период вращения электрона от его скорости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 38

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ОПЫТА ЮНГА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить схему наблюдения интерференционных рефлексов с помощью опыта Юнга.
2. Рассчитать условия образования темных и светлых интерференционных полос в опыте Юнга.
3. Рассчитать расстояния между светлыми и темными интерференционными полосами в опыте Юнга.
4. Рассчитать угловое расстояние между светлыми (или темными) интерференционными полосами.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. - В 3 т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1989. - 480 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При изучении света ещё в 15 веке были установлены факты попадания света в область геометрической тени и появлении при наложении пучков света чередующихся светлых и темных полос.

Результаты сложения световых пучков были впервые точно истолкованы на основе волновых представлений Юнгом. При дальнейшем изучении этого вопроса Юнг открыл принцип интерференции (сам термин был введён Юнгом в 1802 году). Схема опыта Юнга представлена на рис. 1.

Малое отверстие A в непрозрачном экране освещается интенсивным источником света. Согласно принципу Гюйгенса это отверстие является источником распространения элементарных полусферических волн. Эти волны падают на два малых отверстия B_1 и B_2 , которые в свою очередь становятся источниками волн, накладывающихся друг на друга в области D . Так как колебания в отверстиях B_1 и B_2 вызываются одной и той же падающей на них волной, то их амплитуды и фазы одинаковы. Волны, исходящие из точек B_1 и B_2 , сходятся в каждой точке области D с разностью хода, определяемой пройденными ими путями. В зависимости от этой разности хода они усиливают или ослабляют друг друга.

Если в разности хода укладывается целое число длин волн (или четное число длин полуволн) то наблюдается интерференционный максимум (светлая полоса).

$$\Delta = \pm k\lambda, \quad (1)$$

где k - целое число, порядок интерференционного максимума, $k = 0, 1, 2, 3 \dots$

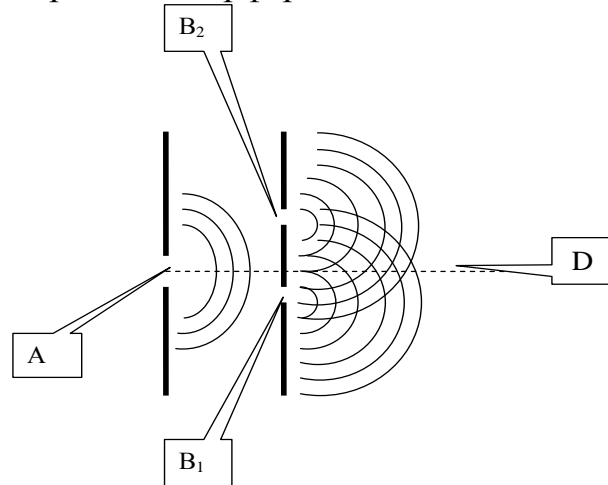


Рисунок 1. Схема опыта Юнга

Если в разности хода укладывается нечетное число длин полуволен, то наблюдается интерференционный минимум (темная полоса).

$$\Delta = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, на экране в области D наблюдается явление наложения двух волновых процессов, проявляющееся в образовании усиленных и ослабленных областей в виде чередующихся светлых и темных полос.

Рассчитаем положение интерференционных рефлексов на экране Э (рис. 2). Пусть точечные источники волн B_1 и B_2 расположены друг от друга на расстоянии d (рис. 2). Будем считать, что колебания в точках B_1 и B_2 совершаются в одной фазе с одинаковыми амплитудами. Результат интерференции волн пусть наблюдается на экране Э, расположенном от точек B_1 и B_2 на расстоянии L , большим по сравнению с d . Определим разность хода Δ , с которой приходят волны в точку C экрана, отстоящую от его середины A на расстоянии l . Поскольку $L \gg d$ и $L \gg l$, то треугольники $B_1 B_2 N$ и AOC подобны.

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{l}{L}.$$

Отсюда

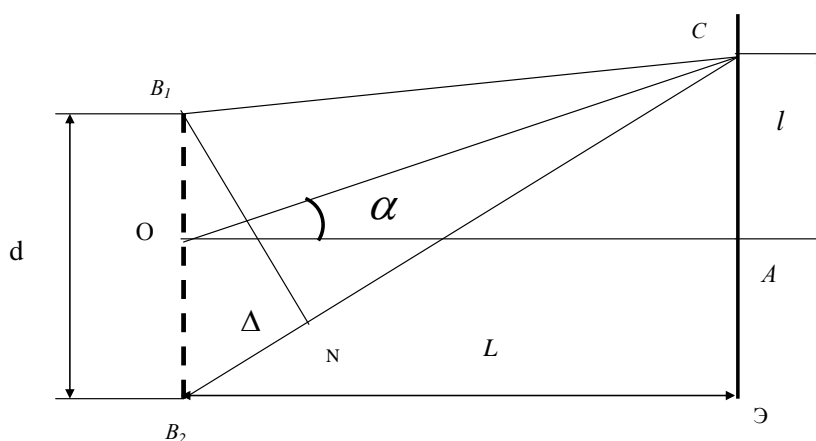
$$\Delta = \frac{l}{L} d. \quad (3)$$

Если в разности хода укладывается целое число длин волн (условие 1), то в точке C на экране Э будет наблюдаться светлая полоса.

$$\Delta = \frac{l}{L} d = \pm k \lambda. \quad (4)$$

Если в разности хода укладывается нечетное число длин полуволен (условие 2), то в точке C на экране Э будет наблюдаться темная полоса.

$$\Delta = \frac{l}{L} d = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Рисунок 2. Расчет разности хода лучей B_1C и B_2C

Видно, что светлые полосы располагаются на расстояниях от середины экрана т. A , равных

$$l = \pm k \frac{\lambda}{d} L, \quad (6)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Темные полосы расположены между светлыми. Расстояние между соседними светлыми полосами равно:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{d} L. \quad (7)$$

Положение светлых полос можно определить также углом $\alpha = \frac{l}{L}$, т.е

$$\alpha = k \frac{\lambda}{d}. \quad (8)$$

Угловое расстояние между соседними светлыми или темными полосами $\Delta\alpha$ равно:

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda}{d}. \quad (9)$$

Из соотношения (9) видно, что угловое расстояние между полосами определяется отношением $\frac{\lambda}{d}$, т.е. отношением длины волны λ к расстоянию между источниками d . Это отношение не должно быть малым, так как в противном случае интерференционные полосы расположатся на слишком малых расстояниях друг от друга.

При наблюдении интерференционной картины в красном свете интерференционные полосы располагаются на больших угловых расстояниях $\Delta\alpha$ друг от друга, а при наблюдении в синем свете – на меньших.

Отсюда следует, что свет различного цвета отличается друг от друга длиной волны (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Цвет цвета	Приблизительный интервал длин волн, λ , мкм
Красный	0,76-0,63
Оранжевый	0,63-0,60
Желтый	0,60-0,57
Зеленый	0,57-0,50
Сине-зеленый	0,50-0,45
Синий	0,45-0,43
Фиолетовый	0,43-0,40

Лучи с длинами волн больше 0,76 мкм и меньше 0,40 мкм человеческий глаз не воспринимает. Первые из них называются инфракрасными, вторые – ультрафиолетовыми.

Свет какой-либо одной определенной длины волны называется монохроматическим.

4. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент позволяет провести виртуальный интерференционный опыт Юнга, в котором монохроматический луч света проходит через две близко расположенные щели. Эти щели генерируют две когерентные световые волны, которые, накладываясь в области перекрытия двух световых пучков, образуют интерференционную картину в виде чередующихся светлых и темных полос. Компьютерная программа предусматривает расчет положения интерференционных полос, их ширину и угол схождения световых лучей.

5. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1», ООО «Физикон».

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите компьютерную программу «Открытая физика 1.1» на ЭВМ.

2. Запустите установленную программу, откройте содержание, запустите раздел «Оптика», откройте программу виртуальной лабораторной работы «Интерференционный опыт Юнга», рис. 3.

3. Установите в соответствие с данными табл. 1 длину волны монохроматического света λ , нм в интервале 400 - 760 нм и расстояние между щелями d , мм в интервале 1 - 2 мм. При проведении компьютерного эксперимента расстояние L между экраном и щелями устанавливается программным способом. Это расстояние равно 4 м.

4. Внимательно изучите интерференционную картину виртуального опыта Юнга. Обратите внимание на положения светлых и темных полос первого и второго порядков интерференции.

5. Рассчитайте расстояние от интерференционной светлой полосы первого и второго порядков спектра до середины экрана. Результаты расчета запишите в табл. 2.

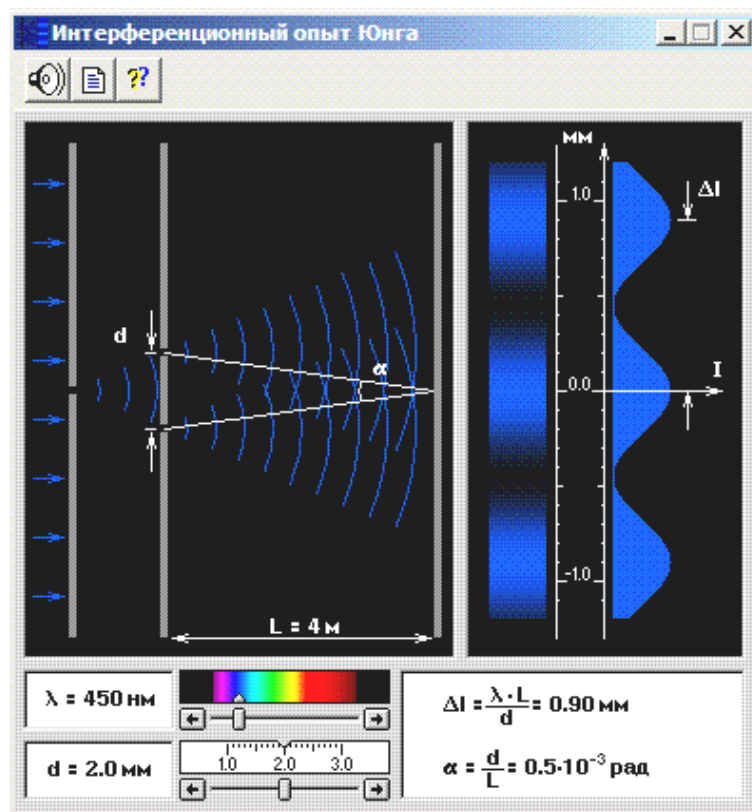


Рисунок 3. Модель «Интерференционный опыт Юнга»

5. Рассчитайте расстояние от интерференционной светлой полосы первого и второго порядков спектра до середины экрана. Результаты расчета запишите в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Светлая полоса					
Номер опыта	Цвет	Длина волны, λ , нм	Расстояние между щелями, d , мм	Порядок спектра, k	Расстояние от светлой полосы до центра экрана, l , мм
1	2	3	4	5	6
1	Красный				
2	Оранжевый				
3	Желтый				
4	Зеленый				
5	Голубой				
6	Синий				
7	Фиолетовый				

6. Рассчитайте расстояние от интерференционной темной полосы первого и второго порядков спектра до середины экрана. Результаты расчета запишите в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Светлая полоса					
Номер опыта	Цвет	Длина волны, λ , нм	Расстояние между щелями, d , мм	Порядок спектра, k	Расстояние от темной полосы до центра экрана, l , мм
1	2	3	4	5	6
1	Красный				
2	Оранжевый				
3	Желтый				
4	Зеленый				
5	Голубой				
6	Синий				
7	Фиолетовый				

7. Рассчитайте (по заданию преподавателя) относительную и абсолютную погрешность l . Результаты расчета запишите в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Номер опыта	$\Delta\lambda$, нм	ΔL , м	Δd , мм	$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta d}{d}, \%$	$\Delta(\Delta l)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

8. Повторите модельный эксперимент по пунктам 1 - 4 для различных длин волн (цветов) (по заданию преподавателя). Результаты измерений запишите в табл. 3 и 4.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните схему проведения опыта Юнга.
2. Получите выражение для определения темных и светлых интерференционных полос в опыте Юнга.
3. Объясните способы получения когерентных источников света: зеркала Френеля, бипризма Френеля, опыт Ллойда, опыт В.П. Линника, билинза Бийе.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Физические постоянные

Постоянная Авогадро $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.
 Постоянная Больцмана $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.
 Универсальная газовая постоянная $R = 8,31441$ Дж/(моль·К).
 Элементарный электрический заряд $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл.
 Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.
 Скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с.
 Постоянная Планка $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с;
 $\hbar = 1,0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $6,59 \cdot 10^{-16}$ эВ·с.
 Масса покоя электрона $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.
 Энергия покоя электрона $E_{0e} = 0,511$ МэВ.
 Масса покоя протона $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,0072776470$ а.е.м.
 Энергия покоя протона $E_{0p} = 938,26$ МэВ.
 Масса покоя нейтрона $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,008665012$ а.е.м.
 Энергия покоя нейтрона $E_{0n} = 939,55$ МэВ.
 Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.
 Постоянная Фарадея $F = N_A \cdot e = 9,648456 \cdot 10^4$ Кл/моль.
 Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).
 Постоянная Вина $b = 0,00289782$ м·К.
 Постоянная Ридберга $R_\infty = 10973731,77$ м⁻¹.
 Радиус первой боровской орбиты $r_0 = 0,529117706 \cdot 10^{-10}$ м.
 Комптоновская длина волны электрона $\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м.
 Магнетон Бора $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл.
 Энергия ионизации атома водорода $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж.

Диэлектрические проницаемости некоторых веществ

Диэлектрик	ϵ	Диэлектрик	ϵ
Вода	81	Полиэтилен	2,3
Воздух	1,00058	Слюда	7,5
Воск	7,8	Спирт	26
Керосин	2,0	Стекло	6,0
Парафин	2,0	Фарфор	6,0
Плексиглас	3,5	Эбонит	2,7

Удельные сопротивления проводников и изоляторов

Проводники	Удельное сопротивление (при 20 °C) ρ , нОм·м	Температурный коэффициент α , $^{\circ}\text{K}^{-1}$	Изоляторы	Удельное сопротивление ρ , Ом·м
Алюминий	25	4,5	Бумага	10^{10}
Вольфрам	50	4,8	Парафин	10^{15}
Железо	90	6,5	Слюда	10^{13}
Золото	20	4,0	Фарфор	10^{13}
Медь	16	4,3	Шеллак	10^{14}
Свинец	190	4,2	Эбонит	10^{14}
Серебро	15	4,1	Янтарь	10^{17}

Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	$\mu-1, 10^{-6}$	Диамагнетики	$\mu-1, 10^{-6}$
Азот	0,013	Водород	-0,063
Воздух	0,38	Бензол	-7,5
Кислород	1,9	Вода	-9,0
Эбонит	14	Медь	-10,3
Алюминий	23	Стекло	-12,6
Вольфрам	176	Каменная соль	-12,6
Платина	360	Кварц	-15,1
Жидкий кислород	3400	Висмут	-176

Физические свойства некоторых полупроводниковых материалов

В таблице приняты обозначения: ρ - плотность; $t_{\text{пл}}$ - температура плавления; α - температурный коэффициент линейного расширения; ε_0 - ширина запрещенной зоны; μ_e - подвижность электронов; μ_d - подвижность дырок.

Вещество	ρ , кг/м ³	$t_{\text{пл}}$, °C	$\alpha \cdot 10^{-6}$, °C	ε_0 , эВ	μ_e , м ² /(В·с)	μ_d , м ² /(В·с)
Ge	5326	937	5,75	0,66	0,39	0,19
Si	2328	1417	2,4	1,107	0,16	0,05
Se	4800	219	47	1,79	-	0,0001
Te	6250	452	16,8	0,33	0,17	0,08
GaAs	5317	1238	6,0	1,428	0,8	0,04
GaSb	5614	712	6,9	0,78	0,4	0,065
InAs	5667	942	5,19	0,356	2,26	0,02
ZnS	4089	1830	6,2	3,6	0,014	0,0005 (700 K)
ZnSe	5260	1520	1,9	2,7	0,053	0,0028
PbS	7610	1113	26	0,41	0,06	0,06
PbTe	6450	924	19,8	0,32	0,17	0,084

Примечания

1. К полупроводникам относят вещества, удельная электропроводность (σ) которых имеет при комнатной температуре промежуточное значение между удельной электропроводностью металлов ($\sigma \approx 10^8 \dots 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) и хороших диэлектриков ($\sigma \approx 10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$).

2. Кремний играет и в ближайшем будущем будет играть основную роль в полупроводниковых устройствах. Однако в ряде ответственных физических и технических устройств кремний вытесняется арсенидом галлия (GaAs): у последнего высокая подвижность электронов, большая, чем у кремния, ширина запрещенной зоны, в 3 раза большая устойчивость к воздействию радиации и большая термическая устойчивость (верхний предел стабильной рабочей температуры составляет до 200 °С против 125 °С у кремния). КПД фотопреобразователей на GaAs достигает 20%, а на Si \approx 15%.

Красная граница λ_0 фотоэффекта

Вещество	$\lambda_0, \cdot 10^{-9} \text{ м}$	Вещество	$\lambda_0, \cdot 10^{-9} \text{ м}$
Алюминий	450	Оксид бария	1235
Барий	484	Оксид меди (I)	239
Барий на вольфраме	1130	Парафин	215
Висмут	330	Платина	230
Вода	200	Ртуть	260
Вольфрам	272	Рубидий	573
Германий	272	Свинец	310
Железо	287	Селен	220
Золото	285	Сера	230
Кадмий	320	Серебро	260
Калий	550	Сурьма	310
Кальций	370	Сурьмяно-цезиевый катод	670
Кислородно-цезиевый катод	1400	Торий на вольфраме	473
Литий	500	Цезий	620
Магний	330	Цезий на вольфраме	909
Медь	270	Цезий на платине	895
Натрий	540	Цинк	290
Никель	249		

Параметры фоторезисторов

Материал чувствительного элемента	Длина волны максимальной чувствительности, $\cdot 10^{-6} \text{ м}$	Граница рабочего диапазона, $\cdot 10^{-6} \text{ м}$	Рабочая температура, K	Обнаружительная способность $\text{Вт}^{-1} \text{ Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$	Постоянная времени, с	Внутреннее сопротивление, Ом
PbS	2,1	2,7	300	$4,5 \cdot 10^8$	10^{-4}	10^4 - 10^7
PbS	2,7	3,5	78	$4 \cdot 10^9$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	10^5 - 10^7
PbTe	4,1	6,0	78	$4 \cdot 10^8$	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^7$
PbSe	2,3-3,4	5,5	78	$2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^6$
InSb	5,5	5,7	78	$8,6 \cdot 10^9$	10^{-6}	10^3 - 10^4
Ge: Au	6	9	78	$7,5 \cdot 10^9$	10^{-6}	10^6
Ge: Zn	36	40	4,2	$4 \cdot 10^9$	10^{-8}	$3 \cdot 10^5$
Hg-Cd-Te	10,6	15	300	10^{10}	10^{-8}	5-50

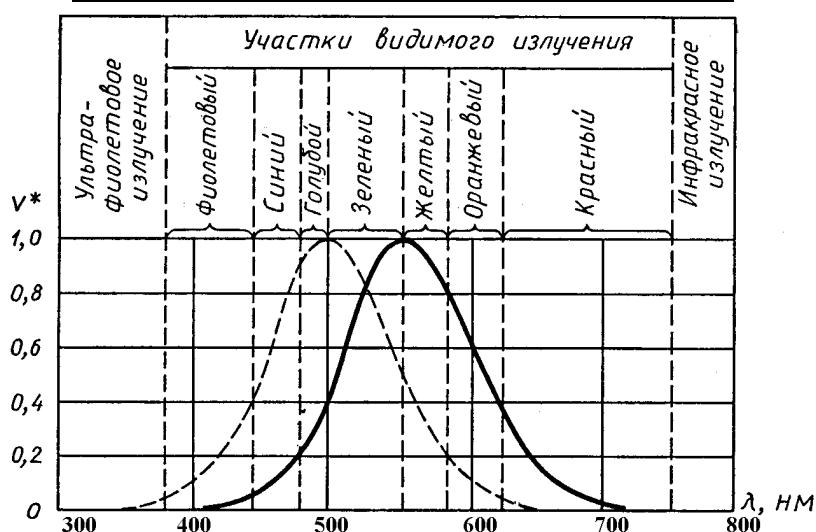
Работа выхода электронов

Вещество	Работа выхода, эВ	Вещество	Работа выхода, эВ	Вещество	Работа выхода, эВ
Алюминий	4,25	Магний	3,64	Ртуть	4,52
Барий	2,49	Медь	4,4	Рубидий	2,16
Бериллий	3,92	Молибден	4,3	Свинец	4,0
Бор	4,5	Калий	2,22	Селен	4,72
Ванадий	4,58	Кальций	2,80	Серебро	4,3
Висмут	4,4	Кобальт	4,41	Сурьма	4,8
Вольфрам	4,54	Кремний	4,8	Таллий	3,7
Германий	4,76	Литий	2,38	Тантал	4,12
Железо	4,31	Натрий	2,35	Торий	3,30
Золото	4,30	Никель	4,50	Углерод	4,7
Индий	3,8	Ниобий	3,99	Уран	3,3
Иридий	4,7	Олово	4,38	Цезий	1,81
Кадмий	3,8	Осмий	4,7	Цинк	4,24
		Платина	5,32	Цирконий	3,9

Основные характеристики фотодиодов

Марка фотодиода	Область спектральной чувствительности, $\cdot 10^{-6}$ м	Длина волны максимальной чувствительности, $\cdot 10^{-6}$ м	Интегральная чувствительность, $\cdot 10^{-3}$ А/лм	Сила темнового тока, $\cdot 10^{-6}$ м	Пороговый поток, лм
ФД-1	0,4-0,6	1,6	20	30	$1,5 \cdot 10^{-10}$
ФД-К1	0,5-1,2	1,0	3,0	3,0	$3 \cdot 10^{-10}$
ФД-А2	0,5-1,2	1,0	6-7	3,0	$2,5 \cdot 10^{-13}$
ФД-8К	0,5-1,2	1,0	$8 \cdot 10^{-6}$	1,0	$1,4 \cdot 10^{-10}$
ФТ-1	0,4-1,9	1,6	170-500	300	$5 \cdot 10^{-7}$
ФТГ-2А	0,4-1,9	1,6	1000	50	$2,5 \cdot 10^{-7}$

Спектральная чувствительность глаза *



Спектральная чувствительность глаза при дневном зрении*

Длина волны, нм	V^*	Длина волны, нм	V^*	Длина волны, нм	V^*
400	0,0004	540	0,954	660	0,061
420	0,004	555	1,000	680	0,017
440	0,023	560	0,995	700	0,004
460	0,060	580	0,870	720	0,001
480	0,139	600	0,631	740	0,00025
500	0,323	620	0,381	760	0,00006
520	0,710	640	0,175		

Показатели преломления n^3

Газы	n	Жидкости	n	Твердые тела	n
Азот	1,00030	Бензол	1,50	Алмаз	2,42
Воздух	1,00029	Вода	1,33	Кварц плавленный	1,46
Кислород	1,00027	Глицерин	1,47	Стекло обычное	1,50
		Сероуглерод	1,63		

* V^* - число, показывающее во сколько раз чувствительность глаза к излучению данной длины волны меньше, чем к излучению с длиной волны 555 нм, называется относительной световой эффективностью (прежнее наименование - относительная видность).

³ Примечание: Показатели преломления зависят и от длины волны света, поэтому приведенные здесь значения n следует рассматривать как условные.

Для кристаллов с двойным лучепреломлением

Длина вол- ны $\lambda, \cdot 10^{-9} \text{ м}$	Цвет	Исландский шпат		Кварц	
		n_e	n_o	n_e	n_o
687	красный	1,484	1,653	1,550	1,541
656	оранжевый	1,485	1,655	1,551	1,542
589	желтый	1,486	1,658	1,553	1,544
527	зеленый	1,489	1,664	1,556	1,547
486	голубой	1,491	1,668	1,559	1,550
431	сине- фиолетовый	1,495	1,676	1,564	1,554
400	фиолетовый	1,498	1,683	1,568	1,558

Показатель преломления n воды для различных длин волн (при $t = 20^\circ \text{C}$)

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
303,4	1,3581	546,1	1,3345
361,1	1,3474	589,3	1,3330
404,7	1,3428	643,8	1,3314
480,0	1,3374	656,3	1,3311
486,1	1,3371	786,2	1,3289
508,6	1,3360	1256,0	1,3210

Зависимость показателя преломления от длины волны

Длина волны, нм	Цвет	С р е д а			
		Стекло (тяжелый флинт)	Стекло (легкий крон)	Вода (при $t = 20^\circ \text{C}$)	Каменная соль
656,3	Красный	1,6444	1,5145	1,3311	1,5407
589,3	Желтый	1,6499	1,5170	1,3330	1,5443
546,1	Зеленый	1,6546	1,5191	1,3345	1,5475
480,0	Синий	1,6648	1,5235	1,3374	1,5541
404,7	Фиолетовый	1,6852	1,5318	1,3428	1,5665

Предельный угол полного отражения

Вещество	Предель-ный угол, $^\circ$	Вещество	Предель-ный угол,
Алмаз	25	Стекло разл. сортов	30...42
Вода	49	Стекло оптическое	
Глицерин	43	марки К80	41
Лед	50	марки К80	38
Орг. стекло	42	марки К80	35
Сероуглерод	38	марки К80	40
Спирт	47	Эфир этиловый	47

Коэффициенты Стьюдента

n-1	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
1	6,31	12,70	31,8	63,7	636,6
2	2,92	4,30	6,96	9,92	31,6
3	2,35	3,18	4,54	5,84	12,9
4	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
5	2,02	2,57	3,36	4,03	6,87
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
7	1,89	2,36	3,00	3,50	5,41
8	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
9	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
10	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
11	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
12	1,78	2,18	2,68	3,05	4,32
13	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
14	1,76	2,14	2,62	2,98	4,14
15	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
16	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
17	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
18	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
19	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
20	1,72	2,09	2,53	2,85	3,85
21	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
22	1,72	2,07	2,51	2,82	3,79
23	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
24	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75
25	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
26	1,71	2,06	2,48	2,78	3,71
27	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
28	1,70	2,05	2,47	2,76	3,67
29	1,70	2,05	2,46	2,76	3,66
30	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
32	1,69	2,04	2,45	2,74	3,62
34	1,69	2,03	2,44	2,73	3,60
36	1,69	2,03	2,43	2,72	3,58
38	1,69	2,02	2,43	2,71	3,57
40	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55