

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию РФ

Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса

ФИЗИКА

Практикум

Владивосток
Издательство ВГУЭС
2009

Рецензенты: В.А. Игнатюк, д-р физ.-мат наук,
профессор;
В.Н. Савченко, д-з физ.-мат. наук,
профессор

ФИЗИКА: практикум / сост. В.А. Доценко, Б.П. Оста-
Ф 48 нин, Л.Р. Родкина, А.И. Шавлюгин, Е.Э. Шмако-
ва. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2009. – 116 с.

В практикуме содержится описание и методические рекоменда-
ции к лабораторным работам по курсу физики, соответствующим су-
ществующей материальной базе, в основе которой находится комплекс
установок, поставленный в университет «Росучприбором». В практи-
куме приведены краткая теория и описание лабораторных работ, соот-
ветствующие всем разделам, традиционно изучаемым в вузовском
курсе физики – механике, молекулярной физике, электричеству и маг-
нетизму, оптике и квантовой физике. В методических указаниях к ка-
ждой лабораторной работе содержатся: краткая теоретическая часть,
описание установки и методики измерений, задания для выполнения
расчетов и подготовки к защите работы. Некоторые работы, теорети-
ческая часть которых не выходит за рамки школьного курса физики,
могут быть использованы при проведении лабораторных занятий с
учащимися общеобразовательных учреждений и колледжей. Поста-
новка лабораторных работ и составление описания осуществлялись
группой авторов: Доценко В.А. – лабораторные работы 3.1, 5.1, 5.2,
5.3, 1.5, Останин Б.П. – 3.4; Родкина Л.Р. – 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, Шавлюгин
А.И. – 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, Шмакова Е.Э. – 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.2,
3.3. Составители сборника благодарны В.М. Нагаеву, принявшему ак-
тивное участие в подготовке практикума к изданию.

Практикум рассчитан на студентов всех форм обучения, в
учебных планах которых предусмотрено изучение физики.

ББК 22.3

Печатается по решению РИСО ВГУЭС

© Издательство Владивостокский
государственный университет
экономики и сервиса, 2009

1. МЕХАНИКА

Лабораторная работа 1.1 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОУДАРЕНИЯ ТЕЛ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 1, §§ 20, 22, 23, 30 или [1], §§ 9, 11, 12, 13, 15). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: проверить закон сохранения импульса, определить коэффициенты восстановления, скорости и энергии при центральном ударе двух шаров, время и среднюю силу соударения.

Теория метода и описание установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 1.1. К штативу 1 прикреплены два шара. Углы отклонения подвесов от вертикали определяются по шкалам 3. Электромагнит 4 служит для удержания одного из шаров в отклоненном положении.

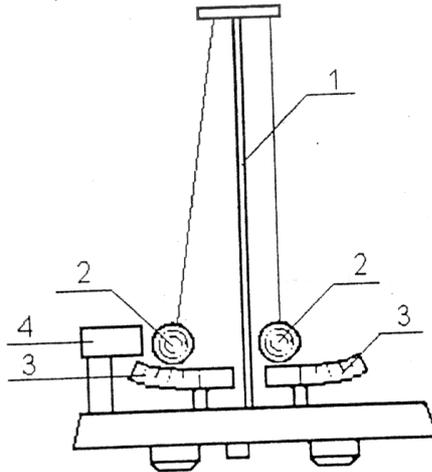


Рис. 1.1. Схема установки

Отведем один из шаров (например, левый) на некоторый угол α_1 и отпустим без начальной скорости. Отклоненный шар будет двигаться вниз, разгоняясь, при этом его потенциальная энергия будет переходить в кинетическую. Пусть столкновение со вторым шаром происходит в тот момент, когда нить первого шара становится вертикально. По закону сохранения механической энергии (рис. 1.2)

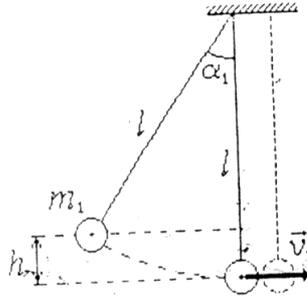


Рис. 1.2. Иллюстрация к закону сохранения энергии

$$m_1gh = \frac{m_1v_1^2}{2}, \quad (1.1)$$

где m_1 – масса шара, g – ускорение свободного падения, h – высота шара в отведенном положении относительно нижней точки траектории, v_1 – скорость первого шара в нижней точке перед соударением со вторым. Из рисунка видно, что

$$h = l - l \cos \alpha_1, \quad (1.2)$$

где l – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шара, α_1 – угол начального отклонения нити. Подставляя (1.1) в (1.2) и преобразуя уравнение, найдем выражение для скорости через угол начального отклонения:

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha_1)} = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_1}{2}. \quad (1.3)$$

Массы шаров подобраны так, чтобы после удара они разлетелись в разные стороны. После удара шары получают скорости v_1^j и v_2^j , и, разлетаясь, отклоняют нити на максимальные углы α_1^j и α_2^j соответственно. Аналогично соотношению (1.3) получаем

$$v_1^j = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_1^j}{2}, \quad v_2^j = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_2^j}{2} \quad (1.4)$$

Если удар происходит достаточно быстро так, что нити во время удара не успевают отклониться на заметный угол, то в направлении горизонтальной оси x не возникает внешних сил и выполняется закон сохранения импульса в проекции на эту ось:

$$m_1v_1 = m_2v_2^j - m_1v_1^j. \quad (1.5)$$

Коэффициент ε_v восстановления скорости определяется как отношение относительной скорости шаров после удара к относительной скорости шаров до удара:

$$\varepsilon_v = \frac{v'_{OIH}}{v_{OIH}} = \frac{\left| \begin{matrix} \rightarrow & \rightarrow \\ v'_2 - v'_1 \end{matrix} \right|}{\left| \begin{matrix} \rightarrow & \rightarrow \\ v_2 - v_1 \end{matrix} \right|}. \quad (1.6)$$

В данном случае формула (1.6) с учетом (1.3), (1.4) преобразуется к виду

$$\varepsilon_v = \frac{v'_2 + v'_1}{v_1} = \frac{\sin \frac{\alpha'_2}{2} + \sin \frac{\alpha'_1}{2}}{\sin \frac{\alpha_1}{2}}. \quad (1.7)$$

Для абсолютно упругого удара $\varepsilon_v = 1$. В случае столкновения реальных шаров столкновение является абсолютно упругим и $\varepsilon_v < 1$.

Кроме коэффициента восстановления скорости соударение тел характеризуется коэффициентом ε_w восстановления энергии, равным отношению кинетической энергии тел после удара к их кинетической энергии до удара:

$$\varepsilon_w = \frac{\frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2}{\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2}. \quad (1.8)$$

Учитывая, что скорость второго шара до удара $v_2 = 0$ и подставляя для скоростей выражения (1.3), (1.4). Находим рабочую формулу для коэффициента восстановления энергии:

$$\varepsilon_w = \frac{m_1 \sin^2 \frac{\alpha'_1}{2} + m_2 \sin^2 \frac{\alpha'_2}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}} \quad (1.9)$$

Если известна длительность удара τ , то из второго закона Ньютона по изменению импульса одного из шаров (например, левого) можно определить среднюю силу взаимодействия между шарами:

$$F_{CP} = \frac{m_2 v_2' + m_2 v_2}{\tau} \quad \text{или} \quad F_{CP} = \frac{m_2 v_2'}{\tau} \quad (1.10)$$

Порядок выполнения работы

1. Подключите электромагнит 4 и клеммы верхнего кронштейна к электронному блоку.

2. Вставьте шары 2 в скобы подвеса. С помощью регулировочных опор выставьте основание установки таким образом, чтобы нижние визиры скоб подвеса указывали на нули шкал.

3. Отрегулируйте положение шаров в вертикальной и горизонтальной плоскостях до совмещения верхних визиров скоб подвеса. Регулировка производится с помощью изменения длины подвеса шаров, а также изменения положения узлов крепления нитей на верхнем кронштейне.

4. На пульте блока нажмите кнопку «СБРОС». При этом на табло индикации высветятся нули, на электромагнит будет подано напряжение.

5. Отведите левый шар и зафиксируйте его с помощью электромагнита. Определите начальный угол отклонения первого шара α_1 .

6. Нажмите кнопку «ПУСК», при этом произойдет удар шаров. По таймеру блока определите время соударения шаров τ .

7. Определите время соударения для различных пар шаров по методике, описанной в пп. 4–6.

8. В правую скобу подвеса вставьте алюминиевый шар со стальной вставкой, а в левую – латунный или стальной шар.

9. Выполните пп. 4–6. При помощи шкал визуально определите углы отскока шаров α_1^l и α_2^l . Повторите измерения углов отскока не менее трех раз. Найдите среднее значение каждого из углов α_{1cp}^l и α_{2cp}^l .

10. По формуле (1.3) определите скорость v_1 первого шара перед ударом. Используя средние значения углов отскока по формулам (1.4) определите скорости обоих шаров сразу после удара v_1^l и v_2^l . Проверьте выполнение закона сохранения импульса (1.5).

11. Используя средние значения углов отскока по формулам (1.7), (1.9) определите коэффициенты восстановления скорости и энергии.

12. Используя найденное выше значение v_2^l по формуле (1.10) определите среднюю силу, с которой шары действуют друг на друга во время удара.

Контрольные вопросы

1. Какой удар называют абсолютно упругим и какой – абсолютно неупругим?

2. Записать законы сохранения импульса и энергии при упругом взаимодействии.

3. Получить формулу скорости шаров после взаимодействия.

4. Проанализировать полученные выражения скорости для шаров различных масс.
5. Что понимается под коэффициентом восстановления скорости и энергии?
6. Как определяется сила соударения?

Лабораторная работа 1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 1, §§ 7, 12, 14 или [1], §§ 5, 6, 7). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. Ознакомьтесь с конспектом лекций.

Цель работы: изучение законов равноускоренного движения.

Теория метода и описание установки

Машина Атвуда (рис. 1.3) состоит из укрепленного на штативе 1 блока 2, через который перекинута нить с подвешенными на ней одинаковыми грузами 3 и 4. Масса этих грузов может быть увеличена добавочными небольшими грузами (перегрузками) 5. Если на груз массы m положить перегрузок с массой m_1 , то вся система начнет двигаться равноускоренно.

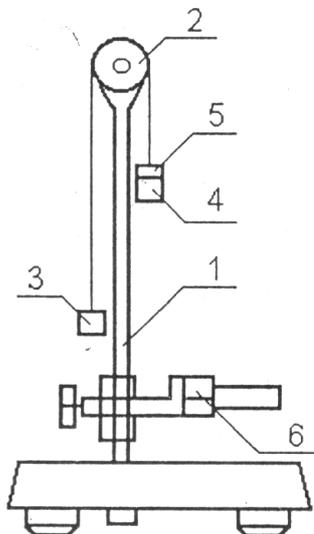


Рис. 1.3. Машина Атвуда

На груз 3 и груз 4 с перегрузом 5 будут действовать две силы: сила тяжести и сила натяжения нити. При этом если масса блока невелика по сравнению с m , и трение мало, то раскручивание блока практически не требует приложения к нему крутящего момента и силы натяжения нити по обе стороны блока равны друг другу. На основании второго закона Ньютона можно написать

$$\begin{cases} (m + m_1)a = (m + m_1)g - T \\ -ma = mg - T \end{cases}, \quad (1.11)$$

где a – ускорение системы, T – натяжение нити, g – ускорение свободного падения. Решение этих уравнений даст величину натяжения нити и величину ускорения:

$$T = gm \frac{2m + 2m_1}{2m + m_1}, \quad (1.12)$$

$$a = g \frac{m_1}{2m + m_1}. \quad (1.13)$$

Отсюда

$$g = a \frac{2m + m_1}{m_1} \quad (1.14)$$

Порядок выполнения работы

1. Перекинуть через блок 2 нить с двумя грузами 3 и 4 и убедиться, что система находится в положении безразличного равновесия.

2. Установить кронштейн с фотодатчиком 6 в нижней части шкалы вертикальной стойки, а фотодатчик расположить таким образом, чтобы правый груз при движении вниз подходил в центре рабочего окна фотодатчика. За нижнее положение груза берется риска шкалы, соответствующая риске на корпусе фотодатчика и являющаяся как бы продолжением оптической оси фотодатчика, которую пересекает движущийся груз. Установить правый груз в крайнем верхнем положении.

3. Положить на правый груз один из перегрузов 5. Нажать на кнопку «ПУСК» блока происходит растормаживание электромагнита, правый груз начинает опускаться, и таймер блока начинает отсчет времени. При пересечении правым грузом оптической оси фотодатчика отсчет времени прекратится. Записать показания таймера, т.е. время движения грузов.

4. Определить по шкале пройденный грузом путь, как расстояние от нижней плоскости груза (в верхнем положении) до оптической оси фотодатчика.

5. Зная пройденный путь и время движения, определяем значение ускорения: $a = \frac{2S}{t^2}$, где S – путь, пройденный грузом, t – время движения груза.

6. Повторить измерения 4–5 раз, изменяя высоту подъема груза в верхнем положении. Найти среднее значение ускорения грузов.

7. Повторить измерения по пп. 2–6 с другим перегрузом.

8. Определить ускорение свободного падения по формуле (2.4).

9. Найти погрешность определения ускорения свободного падения.

Сравнить найденные результаты с ускорением свободного падения, вычисленным для широты Владивостока φ по формуле:

$$g = 9,7803 + (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,00007 \sin^2 2\varphi)$$

Контрольные вопросы

1. Дать определение равноускоренного движения.
2. Записать закон динамики поступательного движения.
3. Что представляет собой машина Атвуда?
4. Получить выражение для определения ускорения свободного падения.

Лабораторная работа 1.3 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА МАКСВЕЛЛА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 1, §§ 34–36, 38, 40 или [1], §§ 11–13). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: ознакомление со сложным движением твердого тела и изучение закона сохранения энергии на примере движения маятника Максвелла.

Теория метода и описание установки

Общий вид установки, используемой в настоящей работе, представлен на рис. 1.4 Маятник Максвелла представляет собой металлический диск 1, в середине которого укреплен металлический стержень 2. К концам этого стержня прикреплены две крепкие (капроновые) нити 3. Они наматываются на стержень (от концов его к диску). Диск маятника представляет собой непосредственно сам диск и сменные кольца, которые закрепляются на диске. При освобождении маятника он начинает движение: поступательное вниз и вращательное вокруг своей оси симметрии.

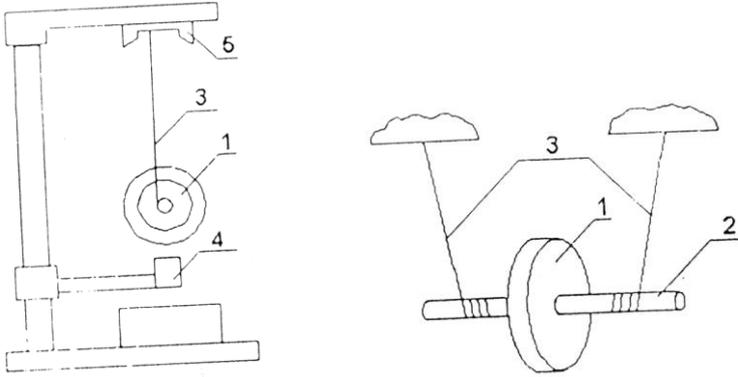


Рис. 1.4. Маятник Максвелла

Вращение, продолжаясь по инерции в низшей точке движения (когда нити уже размотаны), приводит вновь к наматыванию нитей на стержень, а, следовательно, к подъему маятника. Движение маятника после этого замедляется, маятник останавливается и снова начинает свое движение вниз и т.д. Ход маятника (расстояние, проходимое маятником) может быть измерено по вертикальной рейке с делениями, укрепленной на стойке.

Уравнения движения маятника без учета сил трения имеют вид:

$$\begin{cases} ma = mg - 2T, \\ I\varepsilon = 2Tr, \\ a = \varepsilon r, \end{cases} \quad \begin{matrix} (1.1) \\ 5) \\ (1.1) \\ 6) \end{matrix}$$

$$\varepsilon = a/r, \quad (1.17)$$

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (1.18)$$

где m – масса маятника, I – момент инерции маятника, g – ускорение силы тяжести r – радиус стержня, T – сила натяжения нити (одной), a – ускорение поступательного движения, центра масс маятника, ε – угловое ускорение маятника.

Масса маятника m является суммой масс его частей (масса оси m_0 , масса диска m_d и масса кольца m_k $m = m_0 + m_d + m_k$). Момент инерции маятника I также является аддитивной величиной и определяется по формуле

$$I = I_0 + I_d + I_k \quad (1.19)$$

где I_0 , I_d , I_k – соответственно моменты инерции оси, диска и кольца маятника. Момент инерции оси маятника I_0 равен

$$I_0 = m_0 r^2 / 2, \quad (1.20)$$

где r – радиус оси, $m_0 = 0,019$ кг – масса оси.

Момент инерции диска маятника I_d может быть найден как

$$I_d = m_d R_d^2 / 2, \quad (1.21)$$

где R_d – радиус диска, $m_d = 0,1$ кг – масса диска.

Момент инерции кольца I_k находится по формуле

$$I_k = m_k (R_k^2 + b^2 / 4), \quad (1.22)$$

где R_k – средний радиус кольца, m_k – масса кольца, b – ширина кольца,

Из уравнений (1.15)...(1.17) легко можно получить выражение для расчета теоретического значения, ускорения движения центра тяжести маятника:

$$a_1 = g / (1 + I / m r^2). \quad (1.23)$$

Зная линейное и угловое ускорения, легко найти скорость движения оси маятника и угловую скорость его вращения:

$$v = at ; \omega = \varepsilon t \quad (1.24)$$

Полная кинетическая энергия маятника складывается из энергии поступательного перемещения центра масс (совпадающего с центром оси) и из энергии вращения маятника вокруг оси.

$$W_{кин} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}. \quad (1.25)$$

Порядок выполнения работы

Внимание! Все измерения необходимо проводить с большой осторожностью, т.к. маятник легко повредить, если даже незначительно погнуть его стержень. Маятник с погнутым стержнем при своем движении начинает «бить», сильно раскачиваясь из стороны в сторону. Производить измерения с таким маятником опасно, поэтому следует оберегать маятник от ударов об пол, край стола и т.п.

1. Собрать установку «Маятник Максвелла» (рис. 1.4). Установить нижний кронштейн с фотодатчиком 4 и крайнее нижнее положение

шкалы так, чтобы верхняя плоскость кронштейна совпала с одной из рисок шкалы.

Произвести регулировку положения основания установки при помощи регулировочных опор так, чтобы диск на бифилярном подвесе находился в центре окна фотодатчика.

Установить с помощью устройства над электромагнитом необходимую длину бифилярного подвеса таким образом, чтобы нижний край диска маятника находился на 4...5 мм ниже фотодатчика; при этом ось маятника должна занять горизонтальное положение.

Подключить фотодатчик и электромагнит к блоку.

Нажать кнопку «СЕТЬ». При этом должно включиться табло индикации.

Аккуратно вращая маятник, зафиксировать его в верхнем положении при помощи электромагнита 5, при этом необходимо следить за тем, чтобы нить наматывалась на ось виток к витку. В зафиксированном положении нити подвеса должны быть прослаблены.

Нажать на кнопку «СБРОС» для того, чтобы убедиться, что на индикаторе установились нули.

2. Нажать на кнопку «ПУСК» блока. Происходит растормаживание, электромагнитный маятник начинает опускаться, и таймер блока начинает отсчет времени. При пересечении маятником оптической оси фотодатчика отсчет времени прекратится. Записать показания таймера, т.е. время движения груза t .

По шкале стойки определить ход маятника h . Записав значения h и t , нажать клавишу «СБРОС». Для повышения точности измерений повторить опыт до 5–6 раз.

3. Определить экспериментальное значение ускорения a_z по формуле (3.4).

4. С помощью штангенциркуля измерить радиусы оси маятника, диска и кольца и ширину кольца b . Взвесить кольцо, записать его массу. По формулам (3.5) ... (3.8) рассчитать момент инерции маятника.

5. По формуле (3.11) найти кинетическую энергию маятника Максвелла, сравнить ее с потенциальной энергией $W_{nom} = mgh$. По разности этих энергии найти работу сил трения.

Контрольные вопросы

1. Дать понятие момента сил и момента инерции.
2. Записать уравнение динамики вращательного движения.
3. Как определяется энергия вращения?
4. Сформулировать теорему Штейнера.
5. Что представляет собой маятник Максвелла?

Лабораторная работа 1.4

ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 1, §§ 34–40 или [1], §§ 16–19). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимые запишите в свой конспект.

Цель работы: исследование крутильных колебаний и измерение момента инерции тела сложной формы.

Теория метода и описание установки

Момент инерции I – это величина, характеризующая инертность тела при вращательном движении. Величину I можно определить из основного закона динамики вращательного движения:

$$I = \frac{M}{\varepsilon}, \quad (1.26)$$

где M – момент сил, приложенных к телу; ε – его угловое ускорение.

Величина I зависит от размеров, формы и массы тела. Исследуемым телом в данной работе является образец в форме параллелепипеда.

Схема установки представлена рис. 1.5.

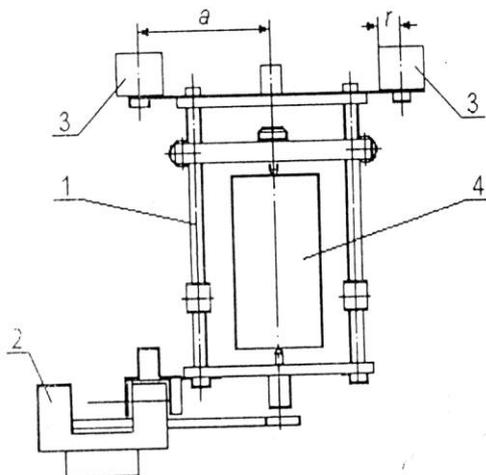


Рис. 1.5. Схема установки

Рамка 1 закреплена на натянутой стальной проволоке, проходящей по ее геометрической оси. Если рамку повернуть на некоторый угол φ ,

то происходит закручивание проволоки. Тогда силы упругости стремятся вернуть рамку в исходное положение. Момент M возвращающей силы при относительно малом угле поворота φ связан с ним соотношением

$$M = -D\varphi, \quad (1.27)$$

где D – коэффициент, называемый модулем кручения проволоки. Величина D зависит от длины проволоки, её диаметра и модуля сдвига, характеризующего упругие свойства материала проволоки. Из формул (1.26) и (1.27) получаем дифференциальное уравнение, описывающее движение рамки:

$$I\varphi'' = -D\varphi, \text{ или } \varphi'' + \omega_0^2\varphi = 0. \quad (1.28)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{I}}.$$

Решением уравнения (1.28) для угла φ является гармоническое $\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \delta)$ с периодом:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}. \quad (1.29)$$

Таким образом, исследуемое тело совершает крутильные колебания. В принципе, момент инерции I можно найти на основе соотношения (1.29), если знать величину D . В данной работе определение модуля кручения D не требуется. Измеряется период колебания T пустой рамки с моментом инерции I . Затем определяется период T , колебаний системы, состоящей из рамки с установленными на нее грузами 3 с известным моментом инерции I_0 . Тогда, согласно формуле (1.29), имеем

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I + I_0}{D}}. \quad (1.30)$$

Исключая из формул (1.29) и (1.30) величину D , получаем формулу для расчета момента инерции I исследуемого тела

$$I = I_0 \frac{T^2}{T_1^2 - T^2}. \quad (1.31)$$

Период колебаний – это продолжительность одного полного колебания. Величину периода можно измерить как время между двумя последовательными прохождениями рамкой положения равновесия в одном и том же направлении. Для повышения точности измерения перио-

да его находят, измеряя длительность t некоторого числа N полных колебаний. Тогда

$$T = \frac{t}{N}. \quad (1.32)$$

Выполнение работы

1. Установить рамку так, чтобы в положении равновесия флажок рамки находился между окнами фотодатчика 2 (рис. 1.5). Установить электромагнит в положение, приблизительно соответствующее 40° по угловой шкале. Включить электропитание нажатием кнопки «СЕТЬ». Затем повернуть рамку так, чтобы она удерживалась в исходном положении электромагнитом. Нажать кнопку «ПУСК». В данной работе рекомендуется брать число полных колебаний N равное 10. Кнопку «СТОП» надо нажимать, когда число полных колебаний по показаниям секундомера будет равно $N - 1$.

2. Измерить длительность времени t для числа полных колебаний рамки $N = 20$. Повторить опыт 4–5 раз. Определить период колебаний рамки T .

3. Установить два груза 3 на планку. Определить период колебаний T_1 рамки с грузами по формуле (1.32).

4. Определить момент инерции рамки по формулам:

$$I_p = \frac{I_0 T^2}{T_1^2 - T^2}; \quad I_0 = 2m \left(\frac{r^2}{2} + a^2 \right), \quad (1.33)$$

где m – масса груза, кг;

$r = 0,015$ м – радиус груза;

$a = 0,052$ м – расстояние от оси вращения рамки до оси грузов.

5. Снять грузы, установить исследуемый образец 4 в рамке и закрепить специальными винтами так, чтобы одна из его геометрических осей совпала с осью рамки. Определить период колебаний T_2 рамки с образцом по формуле (1.32). Определить момент инерции исследуемого образца по формуле:

$$I_0 = I_p \left(\frac{T_2^2}{T_1^2} - 1 \right). \quad (1.34)$$

Рассчитать теоретический момент инерции образца I_0 по формуле

$$I_0 = \frac{m}{12} (a^2 + b^2), \quad (1.35)$$

где a и b – длины сторон параллелепипеда, расположенные в горизонтальной плоскости, m – масса образца.

Сравнить результаты экспериментального определения момента инерции образца с расчетом.

Контрольные вопросы

1. Дать понятия момента сил и момента инерции, угловой скорости и углового ускорения.
2. Записать уравнение динамики вращательного движения.
3. Как определяется период вращения рамки?
4. Записать дифференциальное уравнение, описывающее движение рамки и его решение.
5. Получить формулу момента инерции исследуемого тела.

Лабораторная работа 1.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА «ПУЛИ» БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 12, 16–19 или [2], т. 1, §§ 34–40). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимые запишите в свой конспект.

Цель работы: определение скорости полета «пули» с помощью крутильного маятника.

Теория метода и описание установки

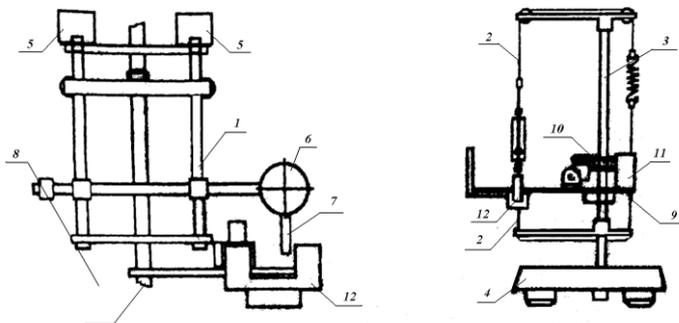


Рис. 1.6. Схема установки

Основным элементом установки (рис. 1.6) является крутильный маятник, представляющий собой металлическую рамку 1, подвешенную на стальной нити 2. Нить подвеса закреплена вертикально в натянутом состоянии на стойке 3 с основанием 4. Рамка может совершать крутиль-

ные колебания вокруг вертикальной оси, проходящей через ее ось симметрии. На ней имеются места для крепления двух дополнительных грузов 5 симметрично относительно оси. К ней же крепится «мишень» 6 в виде диска, поверхность которого покрыта тонким слоем пластилина, флажок 7 для контроля ее колебаний и противовес 8. «Пулей» служит тонкое металлическое кольцо. К стойке на кронштейне 9 крепится «пистолет». К стойке также на кронштейне крепится фотодатчик 12 (лампа + фотоприемник), соединенный с электронным блоком регистрации времени и числа колебаний.

Принцип действия лабораторной установки

После выстрела «снаряд» попадает в «мишень» и прилипает к ее поверхности (рис. 1.7). Соударение снаряда с мишенью происходит за столь короткое время, что поворотом рамки с «мишенью», а следовательно, и действие момента сил упругости нити за это время можно пренебречь. Момент силы тяжести и силы натяжения нити относительно вертикальной оси равен нулю. Таким образом, относительно этой оси суммарный момент внешних сил, действующих на рамку и «снаряд», равен нулю и при соударении выполняется закон сохранения суммарного импульса рамки и «снаряда».

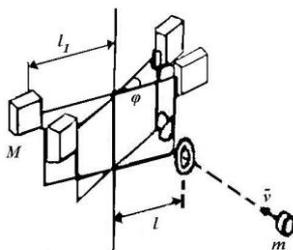


Рис. 1.7. Схема опыта

Момент импульса «снаряда» перед соударением $L_1 = mvl$, где m – масса «снаряда», v – его скорость, l – прицельное расстояние (рис. 1.7). После соударения рамка с грузами приходит во вращение с угловой скоростью, при этом ее момент импульса

$$L_2 = (I_p + 2Ml_1^2)\omega, \quad (1.36)$$

где I_p – момент инерции рамки без грузов. M – масса каждого из грузов, l_1 – расстояние грузов от оси вращения. Вкладом в момент инерции прилипшего «снаряда» можно пренебречь из-за малости его массы.

По закону сохранения $L_1 = L_2$, следовательно:

$$v = \frac{(I_p + 2Ml_1^2)\omega}{ml}. \quad (1.37)$$

Чтобы воспользоваться этой формулой, нужно найти угловую скорость рамки ω и момент инерции рамки с грузами $I_p + 2Ml_1^2$.

Угловую скорость можно найти по углу максимального отклонения φ_m рамки после соударения. После соударения вращение рамки тормозится под действием момента упругих сил в нити подвеса. При этом выполняется закон сохранения энергии. Кинетическая энергия рамки переходит в потенциальную энергию закрученной нити:

$$\frac{(I_p + 2Ml_1^2)\omega^2}{2} = \frac{D\varphi_m^2}{2}, \quad (1.38)$$

где D – модуль кручения проволоки. Модулем кручения называется коэффициент пропорциональности между моментом упругих сил $M_{упр}$ и углом закручивания нити φ : $M_{упр} = -D\varphi$.

Знак минус здесь показывает, что направление момента упругих сил противоположно углу закручивания.

Из соотношения (1.38) находим выражение для угловой скорости:

$$\omega = \varphi_m \sqrt{\frac{D}{(I_p + 2Ml_1^2)}} \quad (1.39)$$

Модуль кручения D и момент инерции $I_p + 2Ml_1^2$ определяют значение периода колебаний рамки. Их соотношение, а также необходимый для вычисления скорости момент инерции рамки с грузами можно найти из измерений периода колебаний рамки с грузами и без них. Для того чтобы понять, как связан период с этими величинами, рассмотрим уравнение вращения рамки, подвешенной на упругой нити:

$$I\ddot{\xi} = -D\varphi,$$

где I – момент инерции рамки в общем случае, ξ – вторая производная от угла по времени, т.е. угловое ускорение. Это уравнение приводится к виду:

$$\ddot{\xi} = -\omega_0^2\varphi, \quad (1.40)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{I}}$. Уравнение (1.40) описывает гармонические колебания с циклической частотой колебаний ω_0 . Период колебаний вычисляется по формуле:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}. \quad (1.41)$$

Обозначив период колебаний рамки без грузов T_1 , с грузами T , по формуле (1.41) имеем:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_p}{D}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{I_p + 2MI_1^2}{D}}. \quad (1.42)$$

Из этих формул получим для угловой скорости (1.39) следующее выражение:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \varphi_m. \quad (1.43)$$

Исключая модуль кручения из формул (1.42) находим момент инерции рамки с грузами:

$$I_p + 2MI_1^2 = \frac{2MI_1^2 T^2}{T^2 - T_1^2}. \quad (1.44)$$

При подстановке соотношений (1.43) и (1.44) в уравнение (1.37) получается выражение:

$$v = \frac{4\pi M I_1^2 T \varphi_m}{ml(T^2 - T_1^2)}. \quad (1.45)$$

Порядок выполнения работы

1. Произведите регулировку положения основания с помощью регулировочных опор. Добейтесь вертикальности нити подвеса.
2. Установите грузы на рамке.
3. Установите «мишень» на рамке. Убедитесь, что «мишень» находится на линии «выстрела» и перпендикулярна ей, а флажок пересекает при колебаниях рамки оптическую ось фотодатчика.
4. Установите «снаряд» на направляющий стержень «пушки», взведите пружину и произведите «выстрел». Визуально определите угол φ_m максимального отклонения не менее трех раз.
5. Измерьте штангенциркулем расстояние l от оси вращения до центра отпечатка «пули» в «мишени».
6. Отклоните рамку с грузами на угол 40° градусов и зафиксируйте с помощью электромагнита. Нажмите на электронном блоке кнопку «СБРОС», при этом должны обнулиться показания счетчиков колебаний и времени. Нажмите кнопку «ПУСК», при этом выключится электромагнит, и начнутся крутильные колебания рамки. Определите время t , за которое происходит N колебаний рамки. Для регистрации времени не-

обходимо нажать кнопку «СТОП» после того, как произойдет $N-1$ полных колебаний. Прибор остановит счет времени в момент завершения N -го колебания. Количество колебаний выберите в пределах 10...15.

7. Измерьте штангенциркулем расстояние l_1 от оси вращения рамки до центров грузов.

8. Снимите грузы с рамки и аналогично п. 6 проведите измерение времени t_1 , за которое происходит N_1 колебаний рамки без грузов. Выберите N_1 в пределах 10÷15.

9. С помощью лабораторных весов определите массы грузов M , массу снаряда m .

10. Вычислите среднее значение угла максимального отклонения при выстреле $\overline{\varphi_m} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_{mi}}{n}$, где n – количество измерений угла максимального отклонения.

11. Вычислите средние периоды колебания рамки с грузами и без грузов: $T = t/N$, $T_1 = t_1/N_1$.

12. Используя среднее значение угла $\overline{\varphi_m}$ (в радианах), вычислите по формуле (5.10) скорость снаряда v .

Контрольные вопросы

1. Дать понятие момента сил, момента инерции, момента импульса тела и системы, угловой скорости, углового ускорения.
2. Записать уравнение динамики вращательного движения и закон сохранения энергии при кручении.
3. Как определяется кинетическая энергия вращения?

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторная работа 2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 8, 10, 12, 28–33 или [2], т. 1, §§ 58–60, 111–112). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение внутреннего трения воздуха как одного из явлений переноса в газах.

Теория метода и описание установки

Явления переноса – это процессы установления равновесия в системе путем переноса массы (диффузия), энергии (теплопроводность) и импульса молекул (внутреннее трение, или вязкость). Все эти явления обусловлены тепловым движением молекул.

При явлении вязкости наблюдается перенос импульса от молекул из слоев потока которые двигаются быстрее, к более медленным. Например, в случае протекания жидкости или газа в прямолинейной цилиндрической трубе (капилляре) при малых скоростях потока течение является ламинарным, т.е. поток газа движется отдельными слоями, которые не смешиваются между собой. В этом случае слои представляют собой совокупность бесконечно тонких цилиндрических поверхностей, вложенных одна в другую, имеющих общую ось, совпадающую с осью трубы.

Вследствие хаотического теплового движения молекулы непрерывно переходят из слоя в слой и при столкновении с другими молекулами обмениваются импульсами направленного движения. При переходе из слоя с большей скоростью направленного движения в слой с меньшей скоростью молекулы переносят в другой слой свой импульс направленного движения, В «более быстрый» слой переходят молекулы с меньшим импульсом. В результате первый слой тормозится, а второй – ускоряется. Опыт показывает, что импульс dP , который передается от слоя к слою через поверхность S , пропорционален градиенту скорости

$\frac{dU}{dr}$, площади S и времени переноса dt :

$$dp = -\eta \frac{dU}{dr} S dt$$

Между слоями возникает сила внутреннего трения.

$$F_T = \left| \frac{dp}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dU}{dr} \right| S, \quad (2.1)$$

где η – динамическая вязкость (коэффициент вязкости).

Для идеального газа

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle U_T \rangle,$$

где ρ – плотность газа; $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул; $\langle U_T \rangle$ – средняя скорость теплового движения молекул,

$U_T = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$; μ – молекулярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная.

Выделим в капилляре воображаемый цилиндрический объем газа радиусом r и длиной l , как показано на рис. 2.1.

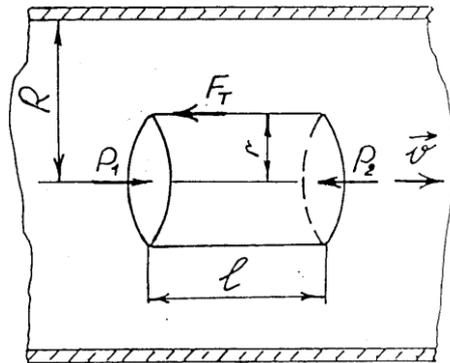


Рис. 2.1. К расчету объемного расхода газа в случае течения его через капилляр

Обозначим давления на его торцах P_1 и P_2 . При установившемся течении сила давления на цилиндр

$$F = (P_1 - P_2) \pi r^2$$

уравновесится силой внутреннего трения F_T , которая действует на боковую поверхность цилиндра со стороны внешних слоев газа:

$$F - F_T = 0 \quad (2.2)$$

Сила внутреннего трения определяется по формуле Ньютона (2.1). Учитывая, что $S = 2\pi r\ell$ и скорость $U(r)$ уменьшается при удалении от оси трубы, т.е. $\frac{dU}{dr} < 0$ можно записать:

$$F_T = -\eta \frac{dU}{dr} 2\pi r\ell. \quad (2.3)$$

В этом случае условие равномерного движения (2.2) запишется в виде:

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 + \eta \frac{dU}{dr} 2\pi r\ell = 0. \quad (2.4)$$

Интегрируя это равенство, получим

$$U(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta\ell} r^2 + C,$$

где C – постоянная интегрирования, которая определяется граничными условиями.

При $r = R$ скорость газа должна обратиться в нуль, поскольку сила внутреннего трения о стенку капилляра тормозит смежный с ней слой газа.

Тогда

$$U(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta\ell} (R^2 - r^2) \quad (2.5)$$

Подсчитаем объемный расход газа Q , т.е. объем, что протекает за единицу времени через поперечное сечение трубы. Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним $r + dr$ ежесекундно протекает объем газа $dQ = 2\pi r dr U(r)$.

Тогда в результате интегрирования получим

$$Q = \int_0^R 2\pi r U(r) dr = \pi \frac{P_1 - P_2}{2\eta\ell} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr,$$

или

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta\ell} R^4. \quad (2.6)$$

Формулу (2.6), которая называется формулой Пуазейля, можно использовать для экспериментального определения коэффициента вязкости газа.

Формула Пуазейля была получена в предположении ламинарного течения газа или жидкости. Однако с увеличением скорости потока движение становится турбулентным, и слои смешиваются. При турбулентном движении скорость в каждой точке меняет свое значение и на-

правление, сохраняется только среднее значение скорости. Характер движения жидкости или газа в трубе определяется числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\langle U \rangle R \rho}{\eta}, \quad (2.7)$$

где $\langle U \rangle$ – средняя скорость потока; ρ – плотность жидкости или газа.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при $R_e \approx 1000$. Поэтому в случае использования формулы Пуазейля необходимо обеспечить выполнение условия $R_e < 1000$. Кроме этого, эксперимент необходимо проводить таким образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда перепад давлений вдоль капилляра значительно меньше самого давления. В данной установке давление газа несколько больше атмосферного (10^3 см вод. ст.), а перепад давлений составляет от ~ 10 см вод. ст., т.е. приблизительно 1% от атмосферного.

Формула (2.6) справедлива для участка трубы, в котором установилось постоянное течение с квадратичным законом распределения скоростей (2.5) по сечению трубы. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия $R \ll L$, где R – радиус; L – длина капилляра.

Экспериментальная установка

Определение коэффициента вязкости воздуха производится на экспериментальной установке ФПТ 1-1, общий вид которой изображен на рис. 2.2.

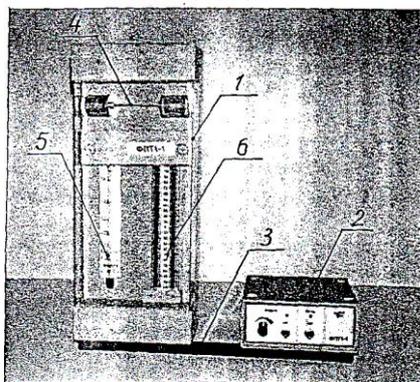


Рис. 2.2. Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-1:

- 1 – блок рабочего элемента; 2 – блок приборов; 3 – стойка;
- 4 – капилляр; 5 – реометр, 6 – манометр

Воздух в капилляр 4 нагнетается микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 2. Объемный расход воздуха измеряется реометром 5, а нужное его значение устанавливается регулятором «Воздух», который находится на передней панели блока прибора. Для измерения разности давлений воздуха на концах капилляра предназначен V-образный водяной манометр 6. Геометрические размеры капилляра – радиус $R=0,0005$ м, длина $L=0,1$ м.

Порядок выполнения работы

1. Включит установку тумблером «Сеть».
2. С помощью регулятора «Воздух» установить по показаниям реометра выбранное значение объемного расхода воздуха Q .
3. Измерить разность давлений ΔP в коленях манометра. Значения Q и ΔP занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Таблица измерений и результатов

Номер измерения	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\eta, \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$

4. Повторить измерения по пп. 2–3 для 5 значений объемного расхода воздуха.

5. Установить регулятор расхода воздуха на минимум, после чего выключить установку тумблером «Сеть. Обработка результатов измерений».

Обработка результатов

1. Для каждого режима определить, используя формулу Пуазейля, коэффициент вязкости воздуха:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8QL}$$

Найти среднее значение коэффициента вязкости.

2. По формуле $\langle U_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха $\mu = 29 \text{ кг/моль}$, а универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$

3. По формуле $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle U_T \rangle}$ вычислить среднюю длину свободного пробега молекул. При этом плотность воздуха взять равной $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$

4. Оценить погрешность результатов измерения.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о явлениях переноса в газах.
2. Объясните явление внутреннего трения в идеальном газе с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
3. Напишите и объясните формулу Ньютона для внутреннего трения.
4. Какой физический смысл коэффициента вязкости? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
5. Напишите формулу для коэффициента вязкости идеального газа.
6. Какая величина называется средней скоростью теплового движения молекул идеального газа? От каких физических величин она зависит?
7. Какая величина называется средней длиной свободного пробега молекулы? От каких физических величин она зависит?
8. В чем заключается капиллярный метод определения коэффициента вязкости газов?
9. Выведите формулу Пуазейля. При каких условиях ее применяют?
10. Как изменяется скорость движения газа по радиусу канала при ламинарном режиме течения?
11. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление внутреннего трения в газах?

Лабораторная работа 2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ОБЪЕМЕ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 50–53 или [2], т. 1, §§ 100–102). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение процессов в идеальных газах, определение отношения теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Теория метода и описание установки

Удельной теплоемкостью вещества называется величина, равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить единице массы вещества для увеличения ее температуры на один Кельвин:

$$C = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (2.8)$$

Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью:

$$\mu C = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT}, \quad (2.9)$$

где m – масса; μ – молярная масса вещества.

Значение теплоемкости газов зависит от условий их нагревания. Согласно с первым законом термодинамики количество теплоты δQ , сообщенное системе, расходуется на увеличение внутренней энергии dU и на выполнение системой работы δA против внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (2.10)$$

Увеличение внутренней энергии идеального газа в случае изменения его температуры на dT

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT, \quad (2.11)$$

где i – число степеней свободы молекулы, под которым подразумевается число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: $i = 3$ – для одноатомной; $i = 5$ – для двухатомной; $i = 6$ – для трех- и многоатомной; R – универсальная газовая постоянная; $R = 8,31$ Дж/(моль \times К).

При расширении газа система выполняет работу

$$\delta A = p dV. \quad (2.12)$$

Если газ нагревать при постоянном объеме $V = const$, то $\delta A = 0$ и согласно с (2.10) все полученное газом количество теплоты расходуется только на увеличение его внутренней энергии $\delta Q_v = dU$ и, учитывая (2.11), молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме

$$\mu C_v = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R. \quad (2.13)$$

Если газ нагревать при постоянном давлении $P = const$, то полученное газом количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии dU и выполнение работы δA :

$$\delta Q_p = dU + p dV .$$

Тогда молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении

$$\mu C_p = \frac{dU}{dT} + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p . \quad (2.14)$$

Используя уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-Менделеева)

$$PV = \frac{m}{\mu} RT ,$$

можно доказать, что для моля газа выполняется соотношение

$$p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = R .$$

Используя выражения (2.13) и (2.14) получим:

$$\mu C_p = \mu C_v + R = \frac{i+2}{2} R . \quad (2.15)$$

Последнее уравнение (2.15) называется формулой Майера. Отношение теплоемкостей определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} . \quad (2.16)$$

Адиабатным называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, $\delta Q = 0$.

На практике он может быть осуществлен в системе, окруженной теплоизоляционной оболочкой, но поскольку для теплообмена необходимо некоторое время, то адиабатным можно считать также процесс, который протекает так быстро, что система не успевает вступить в теплообмен с окружающей средой. Первый закон термодинамики с учетом (2.11–2.13) для адиабатного процесса имеет вид

$$\frac{m}{\mu} \mu C_v dT = -PdV . \quad (2.17)$$

Продифференцировав уравнение Клапейрона-Менделеева

$$pdV + Vdp = \frac{m}{\mu} RdT$$

и подставляя dT в формулу (2.17), получим

$$(\mu C_v + R)PdV + \mu C_v VdP = 0.$$

Учитывая соотношение между молярными теплоемкостями идеального газа при постоянном давлении и объеме, которое описывается формулами (2.15), (2.17) и (2.16), получим уравнение

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0. \quad (2.18)$$

Решение написанного дифференциального уравнения имеет вид

$$PV^\gamma = const \quad (2.19)$$

Уравнение (2.19) называется уравнением адиабаты (уравнением Пуассона), а введенная в (2.6) величина γ – показателем адиабаты.

Метод определения показателя адиабаты, предложенный Клеманом и Дезормом (1819 г.), основывается на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами – адиабатным и изохорным. Эти процессы на диаграмме $P - V$ (рис. 2.3) изображены кривыми соответственно 1–2 и 2–3. Если в баллон, соединенный с открытым водяным манометром, накачать воздух и подождать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в этом начальном состоянии 1 газ имеет параметры P_1, V_1, T_1 , причем температура газа в баллоне равна температуре окружающей среды $T_1 = T_0$, а давление $P_1 = P_0 + P^1$ немного больше атмосферного.

Если теперь на короткое время соединить баллон с атмосферой, то произойдет адиабатное расширение воздуха. При этом воздух в баллоне перейдет в состояние 2, его давление понизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Масса воздуха, оставшегося в баллоне, которая в состоянии 1 занимала часть объема баллона, расширяясь, займет весь объем V_2 . При этом температура воздуха, оставшегося в баллоне, понизится до T_2 . Поскольку процесс 1–2 – адиабатный, к нему можно применить уравнение Пуассона (2.19):

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad \text{или} \quad \frac{T_1^\gamma}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{P_2^{\gamma-1}}.$$

Отсюда

$$\left(\frac{P_0 + P^1}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2} \right)^\gamma. \quad (2.20)$$

После кратковременного соединения баллона с атмосферой охлажденный из-за адиабатного расширения воздух в баллоне будет нагреваться (процесс 2–3) до температуры окружающей среды $T_3 = T_0$ при постоянном объеме $V_3 = V_2$. При этом давление в баллоне поднимется до $P_3 = P_2 + P$. Поскольку процесс 2–3 – изохорный, к нему можно применить закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3},$$

Отсюда

$$\frac{P_0 + P'}{P_0} = \frac{T_0}{T_2} \quad (2.21)$$

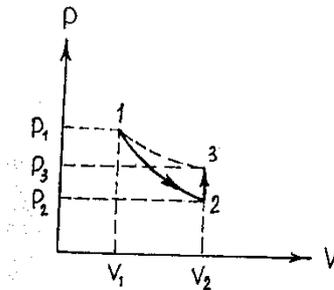


Рис. 2.3. Процессы изменения состояния газа во время проведения опыта

Из уравнений (2.20) и (2.21) получим выражение:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0} \right)^{\gamma}.$$

Прологарифмируем:

$$(\gamma-1) \ln \left(1 + \frac{P'}{P_0} \right) = \gamma \ln \left(1 + \frac{P''}{P_0} \right).$$

Поскольку избыточные давления P' и P'' очень малы по сравнению с атмосферным давлением P_0 и, учитывая, что при $x \ll 1$ $\ln(1+x) \approx x$, будем иметь:

$$(\gamma-1)P' = \gamma P'' ,$$

Откуда

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''} . \quad (2.22)$$

Избыточные давления P' и P'' измеряют с помощью U -образного манометра по разности уровней жидкости с плотностью ρ :

$$P' = \rho g H ; P'' = \rho g h . \quad (2.23)$$

Из (2.22) и (2.23) получим расчетную формулу для определения

$$\gamma = \frac{H}{H - h} \quad (2.24)$$

Экспериментальная установка

Для определения отношения теплоемкостей воздуха $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ предназначена экспериментальная установка ФПТ1-6, общий вид которой показан на рис. 2.4.

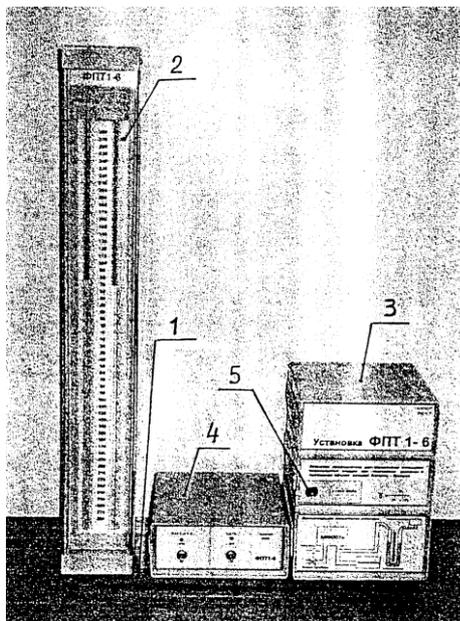


Рис. 2.4. Общий вид экспериментальной установки ФПТ1-6:
1 – стойка; 2 – блок манометра; 3 – блок рабочего элемента; 4 – блок приборов; 5 – пневмотумблер «Атмосфера»

Установка состоит из стеклянной колбы, соединенной с открытым водяным манометром 2. Воздух нагнетается в колбу микрокомпрессором, размещенным в блоке рабочего элемента 3. Микрокомпрессор включается тумблером «Воздух», установленным на передней панели блока приборов 4. Пневмотумблер «Атмосфера» 5, расположенный а панели блока рабочего элемента, в положении «Открыто» позволяет соединять колбу с атмосферой.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером «Сеть».
2. Установить пневмотумблер «Атмосфера» в положение «Закрыто». Для подачи воздуха в колбу включить тумблер «Воздух».
3. С помощью манометра контролируют давление в колбе. Когда разность уровней воды в манометре достигнет 150...250 мм вод. ст., отключить подачу воздуха.
4. Подождать 2...3 мин., пока температура воздуха колбе сравняется с температурой окружающего воздуха T_0 , в колбе при этом установится постоянное давление $P_1 = P_0 + \rho g H$. Определить разность уровней H , установившуюся в коленах манометра, и полученное значение занести в табл. 2.1.

Таблица 2.2

Таблица измерений и результатов

Номер измерения	H , мм вод. ст.	h , мм вод. ст.	γ
-----------------	-------------------	-------------------	----------

5. На короткое время соединить колбу с атмосферой, установив пневмотумблер «Атмосфера» в положение «Открыто».*
6. Через 2–3 мин., когда в колбе установится постоянное давление $P_3 = P_0 + \rho g h$, определить разность уровней h , установившуюся в коленах манометра, и полученное значение занести в табл. 2.2.
7. Повторить измерения по пп. 2–6 не менее 10 раз при различных значениях величины H .
8. Выключить установку тумблером «Сеть».

Обработка результатов измерения

1. Для каждого измерения определить по формуле (2.24) отношение теплоемкостей γ . Найти среднее значение $\langle \gamma \rangle$.
2. Оценить погрешность результатов измерения.

Контрольные вопросы

1. Что такое изопроцессы и каким законам они подчиняются? Нарисуйте графики этих процессов.

2. Сформулируйте 1 закон термодинамики. Запишите этот закон для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов.
3. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?
4. В чем особенности теплоемкости газа? Выведите формулу для молярных теплоемкостей μC_V и μC_P идеального газа.
5. Дайте определение числа степеней свободы молекулы. Чему равна величина i для 1-, 2-, 3- и многоатомного идеальных газов?
6. Какой процесс называется адиабатным? Выведите уравнение Пуассона.
7. Рассчитайте теоретическое значение показателя адиабаты для 1-, 2- и 3-атомного идеального газа.
8. В чем заключается метод Клемана и Дезорма для определения отношения $\frac{C_P}{C_V}$?
9. Опишите рабочий цикл экспериментальной установки по P - V диаграмме.
10. Выведите расчетную формулу для определения γ .
11. Как и почему изменяется температура газа в колбе при проведении опыта?

Лабораторная работа 2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 57–58 или [2], т. 1, §§ 132–136). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: определение изменения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере плавления олова.

Теория метода и описание установки

Фазовый переход первого рода – фазовое превращение, сопровождающееся поглощением или выделением некоторого количества скрытой теплоты и изменением удельного объема вещества; температура перехода остается постоянной и зависит от давления. Значит, для того, чтобы расплавить некоторую массу m вещества, находящуюся при температуре плавления T_{II} необходимо затратить количество теплоты

$$Q_n = \lambda m, \quad (2.25)$$

где λ – удельная теплота плавления данного вещества.

Энтропией называется функция состояния термодинамической системы, дифференциал которой dS при обратимом процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты δQ , сообщенного системе, к термодинамической температуре T системы:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Энтропия всегда определяется с точностью до постоянной величины, поэтому смысл имеет лишь ее изменение при переходе системы из состояния 1 в состояние 2:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (2.26)$$

Процесс плавления олова протекает при постоянной температуре $T = T_{II}$ и, следовательно, является изотермическим. Изменение энтропии при таком процессе можно найти по формуле (2.26):

$$\Delta S_n = \frac{1}{T_{II}} \int_1^2 \delta Q_n = \frac{Q_n}{T_{II}}.$$

Из выражения (2.25) вытекает, что изменение энтропии при нагревании и плавлении олова можно определить как сумму изменений энтропии при нагревании его от начальной температуры T_K до температуры плавления T_{II} и при плавлении олова:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_{II} = \int_{T_K}^{T_{II}} \frac{\delta Q_H}{T} + \frac{Q_n}{T}.$$

Учитывая, что $\delta Q_H = cm dT$, и принимая во внимание формулу (2.25), получаем:

$$\Delta S = cm \int_{T_K}^{T_{II}} \frac{dT}{T} + \frac{\lambda m}{T_{II}},$$

или

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{II}}{T_K} + \frac{\lambda m}{T_{II}}, \quad (2.27)$$

где c и λ – удельная теплоемкость и удельная теплота плавления олова.

Формула (2.27) может быть использована для экспериментального определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова после измерения значения температур T_K и T_{II} .

Экспериментальная установка

Для определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова предназначена экспериментальная установка ФПТ1-11, общий вид которой показан на рис. 2.5.

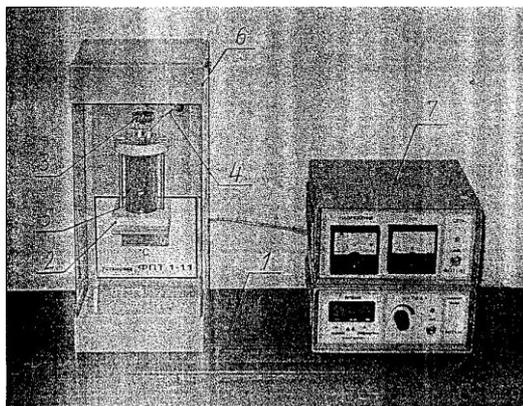


Рис. 2.5. Общий вид экспериментальной установки ФПТ1-11:
1 – стойка; 2 – кронштейн; 3 – нагреватель; 4 – датчик температуры,
5 – тигель с исследуемым материалом; 6 – блок рабочего элемента;
7 – блок приборов

Нагревание олова происходит в тигле с помощью электрического нагревателя 3, источник питания которого размещен в блоке приборов 7. Температура олова измеряется цифровым термометром, расположенным в блоке рабочего элемента 6. Время нагрева измеряется цифровым секундомером, расположенным в блоке приборов. Секундомер приводится в действие при включении питания блока приборов.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером «Сеть» и измерить начальную температуру олова ($T_{\text{п}}$).
2. Одновременно включить нагреватель и запустить секундомер и через каждую минуту измерять температуру олова. Измерения проводить до тех пор, пока температура не достигнет постоянной величины ($T_{\text{п}}$), а затем начнет увеличиваться. Результаты измерений отмечать на графике $T = f(t)$.
3. Выключить нагреватель и провести аналогичные измерения при охлаждении олова, отмечая температуру на том же графике, что и в п. 2.
4. Выключить установку тумблером «Сеть».

Обработка результатов измерения

1. По двум полученным графикам определить температуры, соответствующие участкам графиков, параллельным оси времени, и по их среднему значению найти температуру плавления олова.

2. По формуле (2.27) определить изменение энтропии во время нагревания и плавления олова. Удельную теплоту плавления и удельную теплоемкость олова найти в справочниках.

3. Оценить погрешность результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое фазовый переход первого рода?
2. Что такое энтропия?
3. Чему равно изменение энтропии при изотермическом и адиабатическом процессах?
4. Выведите основную расчетную формулу, используемую в данной работе.
5. В чем заключается метод определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова, который использован в данной работе?
6. До какой температуры нужно нагревать олово в тигле при выполнении эксперимента?
7. Какие основные источники погрешностей данного метода измерений?

Лабораторная работа 2.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ И ПЛОТНОСТИ ГАЗА МЕТОДОМ ОТКАЧКИ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 41–43 или [2], т. 1, §§ 97–98). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: ознакомление с одним из методов определения молекулярной массы и плотности газа.

Теория метода и описание установки

Молекулярной (молярной) массой называется масса одного моля вещества. В единицах СИ эта величина измеряется в килограммах на моль. Модем какого-либо вещества называется количество этого вещества, содержащее столько же структурных элементов (молекул, атомов и т.д.), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C . Молекулярную массу газа можно определить из уравнения газового состояния.

При не очень высоких давлениях, но достаточно высоких температурах газ можно считать идеальным. Состояние такого газа описывается уравнением Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (2.28)$$

где P – давление газа; V – объем газа; m – масса газа; μ – молярная масса газа; $R = 8,31$ Дж/(моль K) – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа.

Из уравнения (2.28) можно получить формулу для молярной массы газа:

$$\mu = \frac{mRT}{PV} \quad (2.29)$$

Если измерение давления P , объема V , температуры T газа, т.е. параметров газа, входящих в формулу (2.29) не вызывает особенных трудностей, то определение массы газа выполнить практически невозможно, так как взвешивание газа возможно только вместе с колбой, в которой он находится. Поэтому для определения μ необходимо исключить массу сосуда. Это можно сделать, рассмотрев уравнение состояния двух масс m_1 и m_2 одного и того же газа при неизменных температуре T и объеме V .

Пусть в колбе объемом V находится газ массой m_1 при давлении P_1 и температуре T . Уравнение состояния (2.28) для этого газа имеет вид

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT \quad (2.30)$$

Откачаем часть газа из колбы, не изменяя его температуры. После откачки масса газа, что оставалась в колбе, и его давление уменьшились. Обозначим их соответственно m_2 и P_2 и снова запишем уравнение состояния

$$P_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT . \quad (2.31)$$

Из уравнений (2.30) и (2.31) получим:

$$\mu = \frac{m_1 - m_2}{P_1 - P_2} \frac{RT}{V} . \quad (2.32)$$

Полученная формула (2.32) дает возможность определить μ , если известно изменение массы газа (но не сама масса), а также изменение давления, температура и объем газа.

В данной работе исследуемым газом является воздух, который представляет собой смесь азота, кислорода, аргона и других газов.

Формула (2.32) пригодна и для определения молярной массы смеси газов. Найденное в этом случае значение представляет собой некоторую среднюю или эффективную молярную массу смеси газов. Молярная масса смеси газов может быть рассчитана и теоретически, если известно процентное содержание и молярная масса каждого из газов, входящих в состав смеси, по формуле

$$\mu_c = \frac{1}{\frac{m_1}{m} \frac{1}{\mu_1} + \frac{m_2}{m} \frac{1}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{m} \frac{1}{\mu_n}}, \quad (2.33)$$

где $\frac{m_1}{m}, \frac{m_2}{m}, \dots, \frac{m_n}{m}$ – относительное содержание каждого газа $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – молярные массы газов.

Если известна молярная масса газа, то можно легко определить еще одну важную характеристику газа – его плотность ρ . Плотность газа – это масса единицы объема газа:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.34)$$

Определив $\frac{m}{V}$ из уравнения Менделеева-Клапейрона, получим

$$\rho = \frac{P\mu}{RT}. \quad (2.35)$$

Плотность смеси газов можно вычислить по формуле (2.35), подразумевающей под μ эффективную молярную массу смеси.

Экспериментальная установка

Для определения молекулярной массы воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТГ-12, общий вид которой показан на рис. 2.6.

Рабочим элементом установки является стеклянная колба 3, соединенная со стрелочным вакуумметром 4, показания которого P есть разность между атмосферным давлением в лаборатории P_0 и давлением газа в колбе P_k . Колба имеет отросток с краном, который с помощью резиновой трубки соединяется с входным патрубком компрессора 5. Колба установлена на тарелке электронных весов. Значение объема V колбы указано на рабочем месте.

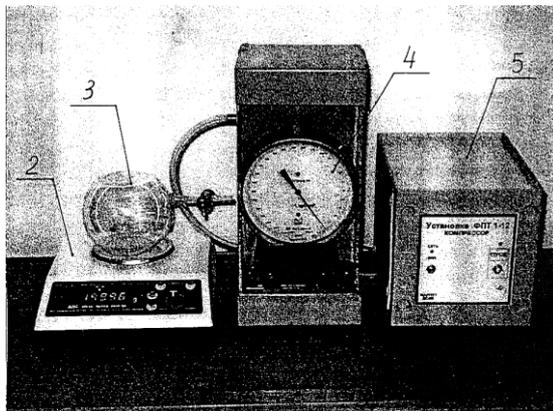


Рис. 2.6. Общий вид экспериментальной установки ФПТ1:
1 – стойка; 2 – весы; 3 – колба; 4 – вакуумметр; 5 – компрессор

Порядок выполнения работы

1. Подать напряжение питания на электронные весы, включив установку тумблером «Сеть».
2. С помощью электронных весов определить массу колбы с воздухом ($m_0 + m_1$) при давлении P_1 .
3. Включив компрессор тумблером «Пуск» и, открыв кран, откачать воздух из колбы до давления P_2 , после чего, закрыв кран и выключив компрессор, определить с помощью весов массу колбы с воздухом ($m_0 + m_2$) при давлении P_2 . Полученные результаты занести в табл. 2.3.
4. Повторить измерения по пп. 2–3 не менее 3 раз.
5. Измерить температуру воздуха в лаборатории.
6. Выключить установку тумблером «Сеть».

Таблица 2.3

Таблица измерений и результатов

№ измер.	m_0+m_1 , кг	m_0+m_2 , кг	m_1-m_2 , кг	P_1 , Па	P_2 , Па	P_1-P_2 , Па	T , К	μ , кг/моль	ρ кг/м ³

Обработка результатов измерения

1. Для каждого проведенного измерения определить массу откачанного воздуха ($m_1 - m_2$) и разность давлений ($P_1 - P_2$).

2. По формуле (2.33) вычислить для каждого измерения значение молекулярной массы воздуха μ . Найти среднее значение $\langle \mu \rangle$.
3. По формуле (2.36) вычислить для каждого измерения плотность воздуха, используя найденное значение молярной массы μ .
4. Оценить погрешность результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое молекулярная масса вещества и в каких единицах она измеряется?
2. Запишите и объясните уравнение Менделеева-Клапейрона. В каких случаях его можно использовать для практических вычислений?
3. Как теоретически рассчитать молекулярную массу смеси газов?
4. Что такое плотность газа и как ее можно определить экспериментально?
5. Выведите расчетную формулу для определения молярной массы, которая используется в данной работе.
6. Почему молярную массу газа нельзя определить непосредственно, используя уравнение Менделеева-Клапейрона?
7. В чем заключается метод откачки для определения молярной массы газа?
8. Назовите основные источники погрешностей данного метода измерения.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Лабораторная работа 3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике [1], §§ 102–105. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение температурной зависимости сопротивления металлов и полупроводников.

Теория метода и описание установки

Все твердые тела по способности проводить электрический ток делятся на металлы, полупроводники и диэлектрики. Диэлектрики имеют полностью заполненную валентную зону и пустую зону проводимости и практически не проводят электрический ток.

Разрешенные зоны металлов заполнены частично, что приводит к существованию электропроводности в этих материалах. Проводимость металлов с повышением температуры уменьшается по линейному закону:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \alpha T) \quad (3.1)$$

где $\sigma_0 = const$, α – температурный коэффициент сопротивления.

Полупроводники образуют средний класс между металлами и диэлектриками и способны проводить электрический ток при $T > 0$ К. При более низких температурах полупроводник является изолятором. Проводимость полупроводников при повышении температуры растет по экспоненциальному закону:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma'_0 e^{-\frac{\Delta E'}{2kT}} \quad (3.2)$$

где $\sigma_0 = const$, α – температурный коэффициент сопротивления – некоторые константы; ΔE – ширина запрещенной зоны; $\Delta E'$ – энергия ионизации атомов примеси; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Анализировать температурную зависимость проводимости твердых тел возможно посредством рассмотрения концентрации носителей тока и их подвижности:

$$\sigma = QNU \quad (3.3)$$

Носителями заряда в металлах являются электроны, и проводимость главным образом определяется их подвижностью, которая линейно уменьшается с ростом температуры.

Полупроводники имеют два типа носителей заряда – электроны и дырки, что усложняет характер их проводимости:

$$\sigma = qn(u_n + u_p) \quad (3.4)$$

Температурная зависимость подвижности в полупроводниках определяется процессами рассеяния и выражается следующей формулой:

$$u = AT^{-3/2} + BT^{3/2} \quad (3.5)$$

где A и B – некоторые константы. При низких температурах носители заряда менее подвижны, и характер проводимости определяется рассеянием на примесях (второе слагаемое в (3.5)). При высоких температурах основную роль играет рассеяние на тепловых колебаниях решетки, и доминирует первое слагаемое. Концентрация носителей заряда в полупроводнике экспоненциально зависит от (температуры, и эта зависимость является решающей в определении проводимости по сравнению со степенной зависимостью подвижности. В формуле (3.2) первое слагаемое отвечает собственной проводимости и преобладает при высоких температурах, второе – при низких температурах в примесном полупроводнике. Практически в эксперименте мы измеряем зависимость сопротивления от температуры, что позволяет нам с учетом формулы:

$$R = \frac{1}{\sigma S} \quad (3.6)$$

убедиться, что для проводящего образца длиной l и поперечным сечением S сопротивление (3а) будет зависеть от температуры образца следующим образом (рис. 3.1, где 1 – металл, 2 – полупроводник): и проверить справедливость формул (3.1) и (3.2), а также рассчитать некоторые зонные параметры полупроводника.

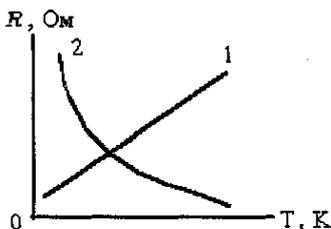


Рис. 3.1. Зависимость сопротивления образцов от температуры

В данной работе вычисляются следующие параметры:

1. Температурный коэффициент сопротивления металла вычисляется по формуле (3.7):

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \quad (3.7)$$

где R_0 – сопротивление проводника при $t = 0$ град Цельсия. Этот коэффициент численно равен значению изменения сопротивления проводника при нагреве на 1 град Цельсия, деленному на сопротивление проводника при $t = 0$ град Цельсия.

2. Ширина запрещенной зоны полупроводника. Для собственных полупроводников второе слагаемое в (3.2) отсутствует, что позволяет после логарифмирования (3.2) записать с учетом формулы (3.6):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{1}{2kT} \Delta E \quad (3.8)$$

Последнее выражение в координатах $\ln R$ и $\frac{1}{T}$ представляет собой уравнение прямой, тангенс угла наклона которой можно определить по графику, построенному по экспериментальным точкам (рис. 3.2):

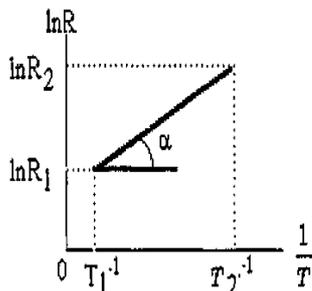


Рис. 3.2. Зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры

Это позволяет вычислить ширину запрещенной зоны:

$$\Delta E = 2kT \times \operatorname{tg} \alpha \quad (3.9)$$

Для примесного полупроводника при вычислении необходимо воспользоваться линейной частью зависимости $\ln R = f(1/T)$, расположенной в области малых значений $1/T$ (т.е. в области высоких температур).

3. Энергия ионизации атомов примеси.

Для полупроводников, имеющих примеси, проводимость при низких температурах определяется в основном проводимостью примеси. Пренебрегая при низких температурах первым слагаемым в (3.2), после логарифмирования и подстановки в (3.6) получаем (3.10):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{1}{2kT} \Delta E' \quad (3.10)$$

Следовательно, при низких температурах получаем зависимость, аналогичную рис. 3.2, позволяющую вычислить энергию ионизации атомов примеси по формуле (3.11):

$$\Delta E' = 2k \times \text{tg} \alpha \quad (3.11)$$

4. Энергия Ферми.

В собственных полупроводниках уровень Ферми располагается в середине запрещенной зоны. Следовательно, определив ширину запрещенной зоны, можем рассчитать энергию Ферми:

$$E_f = \frac{1}{2} \Delta E \quad (3.12)$$

Приборы и оборудование

Установка выполнена в виде двух функционально законченных блоков; блока управления и индикации (БУИ) и блока нагревателя (БН). Общий вид установки показан на рис. 3.3.

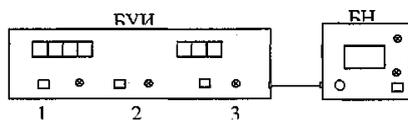


Рис. 3.3. Общий вид лабораторной установки

На передней панели БУИ размещены органы управления, позволяющие включать и отключать нагреватель и вентилятор, а также фиксировать показания температуры и сопротивления. На блоке нагревателя имеются переключатели для переключения типа образца (металл – 1, 2, полупроводник – 3). Цифрами обозначены следующие органы управления установкой: 1 – клавиша «СТОП ИНД» – фиксация показаний; 2 – клавиша «Нагрев» – включение и выключение нагревателя; 3, клавиша «вент» – включение и выключение вентилятора в блоке нагревателя; 4 – переключатель типов образцов; 5 – клавиша «сеть». Температура и сопротивление образца контролируются по индикаторам «С» и «Ом, кОм, Мом». Для фиксации показаний температуры и сопротивления необходимо нажать клавишу 1, при этом на индикаторах установится значение,

соответствующее моменту нажатия. Фактическое значение этих величин соответствует отжатою положению клавиши 5 «СТОП ИНД». Для нагрева образцов необходимо нажать клавишу 3 «Нагрев». При включенном нагревателе на панели загорается индикатор «Нагрев». Пределы измерения устанавливаются автоматически.

Порядок выполнения работы

1. Включить тумблер «Сеть» на БУИ и нажать клавишу «Сеть» на БН. При этом должны загореться индикаторы «Сеть».
2. Переключить тумблер образец на БН в положение 1, т.е. подключить металлический образец.
3. Включить нагрев образца клавишей 2 «Нагрев» и наблюдать по индикатору температуры нагрев образца.
4. Снять показания индикаторов температуры и сопротивления с шагом 5°C до максимальной температуры 120°C. Результаты занести в табл. 3.1

Таблица 3.1

Номер	1	2	3	...
t , град Цельсия				
R , Ом				

5. По достижении 120°C выключить нагрев образца клавишей 2 и нажать клавишу 3 «вент».

6. Переключить тумблер образец по указанию преподавателя и повторить 3, 4, заноса данные в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Номер	1	2	3	...
t , град Цельсия				
T^{-1} , K^{-1}				
R , $кОм$				
$\ln R$				

7. Снять показания температуры и сопротивления металлического образца и полупроводника при остывании с шагом 5 градусов от мак-

симальной температуры до 30 град Цельсия. Результаты занести в табл. 3.2.

8. Нажатием тумблера и клавиши «Сеть» отключить установку.

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 3.1 построить зависимость $\ln R = f(T)$. Экстраполяцией определить начальное значение сопротивления.

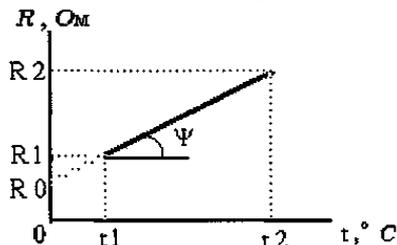


Рис. 3.4. Зависимость сопротивления проводника от температуры

2. По формуле (3.7) вычислить значение температурного коэффициента сопротивления металла и оценить его погрешность. По известным табличным значениям коэффициента определить, какой это металл.

3. По результатам вычислений, сведенных в табл. 3.2, построить график $\ln R = f(1/T)$ (рис. 3.5).

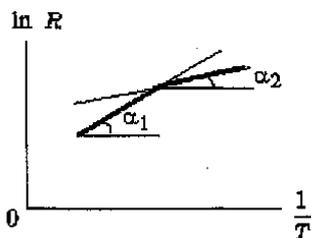


Рис. 3.5. График зависимости $\ln R$ от обратной температуры

4. По виду графика $\ln R = f(1/T)$ определить тип полупроводника (собственный или примесный). Выделить прямолинейные участки (рис. 3.5).

5. По формулам (3.8–3.12) рассчитать ширину запрещенной зоны, энергию ионизации атомов примеси (для примесного полупроводника), энергию Ферми (для собственного полупроводника).

Контрольные вопросы

1. Объясните с точки зрения зонной теории различное поведение электропроводности металлов и полупроводников при изменениях температуры.
2. Что такое температурный коэффициент сопротивления металла.
3. Что представляет собой зонная структура металла и полупроводника.
4. Что такое энергия Ферми.
5. Что такое собственная и примесная проводимости полупроводника.

Лабораторная работа 3.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 113–115, или [2], т. 2, §§ 72–74). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы Определение $|e|/m$ электрона методом магнетрона.

Существуют различные методы определения отношения $|e|/m$, в основе которых лежат результаты исследования движения электрона в электрическом и магнитном полях. Один из них – метод магнетрона. Называется он так потому, что конфигурация полей в нем напоминает конфигурацию полей в магнетронах – генератора электромагнитных колебаний.

Сущность метода состоит в следующем: специальная двухэлектродная электронная лампа, электроды которой представляют собой коаксиальные цилиндры, помещается внутри соленоида так, что ось лампы совпадает с осью соленоида. Электроны, вылетающие из катода лампы, при отсутствии тока в соленоиде движутся радиально к аноду. При протекании тока по соленоиду в лампе создается магнитное поле, параллельное оси лампы, и на электроны начинает действовать сила Лоренца (3.13)

$$\vec{F} = e \left[\vec{v} \cdot \vec{B} \right]. \quad (3.13)$$

где e – заряд электрона, \vec{v} – скорость электрона, B – индукция магнитного поля.

Под действием этой силы, направленной в каждый момент времени перпендикулярно вектору скорости, траектория электронов искривляется. При определенном соотношении между скоростью электрона и ин-

дукцией магнитного поля электроны перестают падать на анод, и ток в лампе прекращается.

Рассмотрим подобное движение электронов в лампе при наличии магнитного поля. Для описания этого движения воспользуемся цилиндрической системой координат (рис. 3.6), в которой положение электрона определяется расстоянием его от оси лампы z , полярным углом φ и смещением вдоль оси Z .

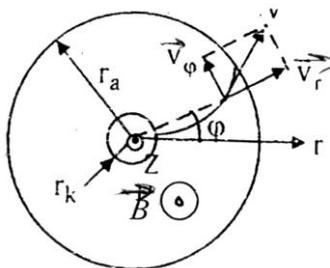


Рис. 3.6. Цилиндрическая система координат

Электрическое поле, имеющее только радиальную компоненту, действует на электрон с силой, направленной по радиусу от катода к аноду. Магнитная сила, действующая на электрон, не имеет составляющей, параллельной оси Z . Поэтому электрон, вылетевший из катода без начальной скорости (начальной скорости электронов, определяемые температурой катода, много меньше скоростей, приобретаемых ими при движении в электрическом поле лампы), движется в плоскости, перпендикулярной оси Z .

Момент импульса L_z электрона относительно оси Z .

$$L_z = mv_\varphi r, \quad (3.14)$$

где $v_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$ – составляющая скорости, перпендикулярная радиусу r .

Момент M сил, действующих на электрон, относительно оси Z определяется только составляющей магнитной силы, перпендикулярной r . Электрическая сила и составляющая магнитной силы, направленные вдоль радиуса r , момента относительно оси Z не создают.

Таким образом:

$$M_z = rF_\varphi = r|e|v_r B, \quad (3.15)$$

где $v_r = \frac{dr}{dt}$ – радиальная составляющая скорости электрона.

Согласно уравнению моментов

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (3.16)$$

Проектируя на ось Z, получим

$$\frac{d(mv_{\varphi}r)}{dt} = |e|rv_{\varphi}B = |e|r \frac{dr}{dt} B$$

или

$$\frac{d(mv_{\varphi}r)}{dt} = \frac{1}{2}|e|B \frac{d(r^2)}{dt}. \quad (3.17)$$

Интегрируем уравнение (3.17):

$$mv_{\varphi}r = \frac{1}{2}|e|Br^2 + const.$$

Константу найдем из начальных условий: при $r = r_v$ (где r_v – радиус катода) $v_{\varphi} = 0$.

Тогда:

$$\begin{aligned} const &= -\frac{1}{2}|e|Br_k^2 \\ v_{\varphi} &= \frac{|e|B}{2mr}(r^2 - r_k^2). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе сил электрического поля:

$$\frac{m(v_{\varphi}^2 - v_r^2)}{2} = |e|u, \quad (3.19)$$

где u – потенциал относительно катода точки поля, в которой находится электрон.

Подставляя в (3.19) значение v_{φ} из (3.18), получаем

$$|e|u = \frac{m}{2} \left[v_r^2 + \frac{e^2 B^2}{4m^2 r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right]. \quad (3.20)$$

При некотором значении индукции магнитного поля B_{kp} , которое называют критическим, скорость электрона вблизи анода станет перпендикулярной радиусу r , т.е. при $r = r_a$, $v_r = 0$. Тогда уравнение (3.20) примет вид

$$|e|u_a = \frac{e^2 B_{kp}^2}{8m r_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2, \quad (3.21)$$

где u_a – потенциал анода относительно катода (анодное напряжение);
 r_a – радиус анода.

Отсюда находим выражение для удельного заряда электрона

$$\frac{|e|}{m} = \frac{8u_a}{B_{kp}^2 r_a^2 (1 - r_k^2 / r_a^2)^2}. \quad (3.22)$$

Индукция магнитного поля соленоида, длина L которого соизмерима с диаметром D , находится по формуле

$$B_{kp} = \frac{\mu_0 N i_{kp}}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (3.23)$$

где N – число витков соленоида, i_{kp} – ток в соленоиде, L – длина соленоида, D – диаметр его витков.

Таким образом, экспериментально определив B_{kp} , можно вычислить величину e/m .

Для нахождения B_{kp} в лампе следует установить разность потенциалов между анодом и катодом и, включив ток в соленоиде, постепенно наращивать его, что увеличивает магнитное поле в лампе.

Если бы все электроны покидали катод со скоростью, равной нулю, то зависимость величины анодного тока от величины индукции магнитного поля имела бы вид, показанный на рис. 3.7 (пунктирная линия). В этом случае при $B < B_{kp}$ все электроны, испускаемые катодом, достигали бы анода, а при $B > B_{kp}$ ни один электрон не попадал бы на анод.

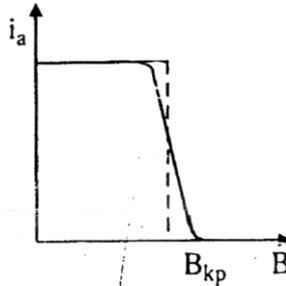


Рис. 3.7. Зависимость индукционного тока от величины магнитного поля

Однако некоторая некоаксиальность катода и анода, наличие остаточного газа в лампе, падение напряжения вдоль катода и т.д. приводят к тому, что критические условия достигаются для разных электронов при различных значениях B . Все же перелом кривой останется достаточно резким и может быть использован для определения $B_{кр}$.

Экспериментальная установка

1. ФПЭ-03 – модуль
 2. ФПЭ-ИП – источник питания
 3. МТ – мультиметр
- Структурная схема установки приведена на рис. 3.8.

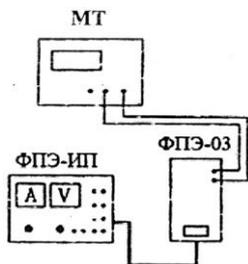


Рис. 3.8. Структурная схема установки

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему установки (рис. 3.8).
2. Установить анодное напряжение $u_a = 50\text{В}$ по вольтметру источника питания – ФПЭ-ИП.
3. Изменяя ток в соленоиде от минимального через $0,1\text{А}$ при постоянном анодном напряжении, снять сбросовую характеристику, т.е. зависимость анодного тока i_a от тока в соленоиде i_c . Значения анодного тока i_a определяемые по мультиметру МТ, и значения тока в соленоиде, определяемые по показаниям амперметра – источника питания ФПЭ-ИП, занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Таблица измерений и результатов

$u_a = 50\text{ В}$		$u_a = \dots\text{ В}$		$u_a = \dots\text{ В}$	
i_c <i>A</i>	i_a <i>мкА</i>	i_c <i>A</i>	i_a <i>мкА</i>	i_c <i>A</i>	i_a <i>кА</i>

4. Повторить пп. 2 и 3 при двух других значениях анодного напряжения (больших 50В). Результаты измерений занести в табл. 3.3.

5. Для каждого значения анодного напряжения построить сбросовую характеристику, откладывая по оси ординат значения анодного тока i_a , а по оси абсцисс – значения тока в соленоиде i_c . Для нахождения критического значения тока в соленоиде $i_{кр}$, провести до взаимного пересечения касательную к точке перегиба сбросовой характеристики (на участке ее спада) и прямую, соответствующую изменению минимальных значений анодного тока (как показано на рис. 3.9).

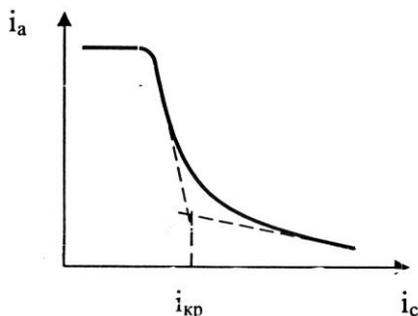


Рис. 3.9. Зависимость анодного тока от силы тока в соленоиде

Занести полученные значения $i_{кр}$ в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Таблица измерений и результатов

u_a , В	$i_{кр}$, А	$B_{кр}$, Тл	$ e /m$, Кл/кг
-----------	--------------	---------------	-----------------

6. Для каждого критического значения тока в соленоиде $i_{кр}$ по формуле (3.23) рассчитать индукцию магнитного поля $B_{кр}$. Величины L , D , N , r_a , r_k указаны на передней панели модуля ФПЭ-03.

7. Вычислить $|e|/m$ по формуле (3.22) для каждого значения $B_{кр}$ и определить среднее

Значение $\overline{|e|/m}$.

8. Вычислить погрешность полученной величины $\overline{|e|/m}$.

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода магнетрона для определения отношения $|e|/m$?

2. Будет ли влиять на величину $B_{кр}$ изменение направления тока соленоида на противоположное?
3. Зависит ли величина $|e|/m$ от величины анодного напряжения?
4. Получить формулу для расчета магнитной индукции на оси соленоида.
5. Вывести расчетную формулу для данной лабораторной работы.

Лабораторная работа 3.3 ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 117–119 или [2], т. 2, §§ 42, 50, 79). Прочитайте краткие теоретические сведения, необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: исследование магнитного поля на оси соленоида с использованием датчика Холла.

Теория метода и описание установки

Сначала получим выражение для расчета индукции \vec{B} магнитного поля на оси кругового тока (рис. 3.10).

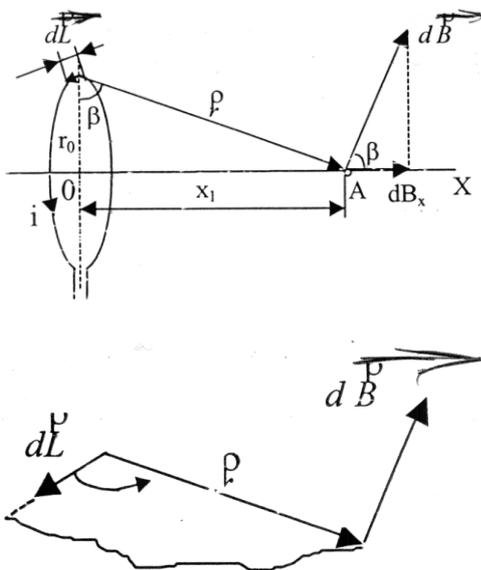


Рис. 3.10. К расчету индукции магнитного поля проводника с током

Из закона Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля от элемента кругового тока $d\vec{L}$ в точке A равна

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i \left[d\vec{L} \times \vec{r} \right]}{4\pi r^3}$$

или в скалярной форме

$$dB = \frac{\mu_0 i dL}{4\pi r^2}, \quad (3.24)$$

так как угол между векторами $d\vec{L}$ и \vec{r} равен $\pi/2$.

Осевая составляющая индукции магнитного поля от элемента тока

$$dB_x = dB \cos \beta = dB \frac{r_0}{r} = \frac{\mu_0 i r_0}{4\pi r^3} dL. \quad (3.25)$$

Индукция e от кругового витка с током направлена вдоль оси витка OX и согласно (3.24) запишется

$$B = \int_0^{2\pi_0} dB_x = \int_0^{2\pi_0} \frac{\mu_0 i r_0}{4\pi r^3} dL = \frac{\mu_0 i r_0}{4\pi r^3} \int_0^{2\pi_0} dL = \frac{\mu_0 i r_0^2}{2r^3}. \quad (3.26)$$

Учитывая, что

$$r = \sqrt{r_0^2 + x_1^2}, \quad (3.27)$$

получаем

$$B = \frac{\mu_0 i r_0^2}{2(r_0^2 + x_1^2)^{3/2}}, \quad (3.28)$$

где x_1 – расстояние от центра витка до рассматриваемой точки A .

Теперь рассмотрим соленоид, как систему круговых токов, соединенных последовательно. Определим индукцию магнитного поля в произвольной точке O на оси соленоида (рис. 3.11).

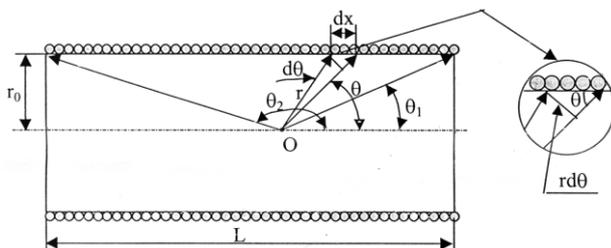


Рис. 3.11. Индукция магнитного поля на оси соленоида

Пусть на единицу длины соленоида приходится n витков. Тогда на участке dx будет (ndx) витков, которые в точке O создадут магнитное поле с индукцией

$$dB_x = \frac{\mu_0 i r_0^2 n dx}{2r^3}. \quad (3.29)$$

Из геометрических построений, показанных на рис. 3.11, следует

$$r = \frac{r_0}{\sin \theta}; \quad dx = \frac{rd\theta}{\sin \theta}. \quad (3.30)$$

Подставляя (3.30) в (3.29), имеем

$$dB_x = \frac{1}{2} \mu_0 i n \sin \theta d\theta. \quad (3.31)$$

Интегрируя (3.31), получаем выражение для расчета индукции магнитного поля на оси соленоида

$$B_x = \frac{1}{2} \mu_0 i n \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 i n}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (3.32)$$

где θ_1 и θ_2 – углы между радиусами-векторами, проведенными из точки O к крайним виткам, и осью соленоида.

Приблизительный вид изменения индукции магнитного поля вдоль оси соленоида показан на рис. 3.12. Значение $x = 0$ соответствует средней точке на оси соленоида.

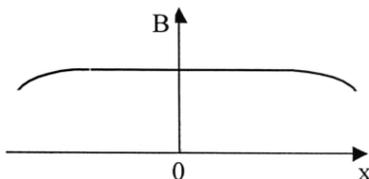


Рис. 3.12. Изменение индукции магнитного поля вдоль оси соленоида

Получим формулу для расчета индукции B_0 магнитного поля в средней точке на оси соленоида длиной L и диаметром D . В этом случае

$$\cos \theta_1 = \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}}; \quad \cos \theta_2 = -\frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}}.$$

Учитывая, что $n = N/L$ (где N – число витков в соленоиде), из (3.32) для средней точки на оси соленоида имеем

$$B_0 = \frac{\mu_0 i N}{\sqrt{L^2 + D^2}}. \quad (3.33)$$

В случае бесконечно длинного соленоида $\theta_1 = 0$; $\theta_2 = \pi$, тогда из (3.32) получаем

$$B_\infty = \mu_0 i n \quad (3.34)$$

В работе для изучения индукции магнитного поля на оси соленоида используется метод, основанный на явлении (эффекте) Холла. Это возникновение в твердом проводнике (или полупроводнике) с током плотностью j , помещенном в магнитное поле с индукцией B , электрического поля напряженностью E . Как следствие, между электродами, касающимися боковых граней образца, возникнет разность потенциалов $\Delta\varphi_x$ (рис. 3.13).

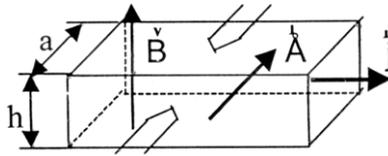


Рис. 3.13. Эффект Холла

ЭДС Холла может быть записана в виде

$$\Delta\varphi_x = R_x j B a, \quad (3.35)$$

где R_x – постоянная Холла, a – ширина проводника. Плотность тока определяется формулой

$$j = \frac{i_d}{ah}, \quad (3.36)$$

где i_d – управляющий ток через датчик Холла.

Подставляя (3.36) в (3.35), получаем

$$\Delta\varphi_x = R_x \frac{i_d B}{h}. \quad (3.37)$$

Обычно значение постоянной Холла для полупроводников значительно больше, чем для проводников.

Экспериментальная установка

В работе используется полупроводниковый датчик Холла (Х501) конструкция которого показана на рис. 3.14.

Датчик Холла 1 располагается на торце специального штока (зонда), который перемещается по оси соленоида. Для определения положения штока внутри соленоида на его боковой грани нанесена сантиметровая шкала 2. К штоку подсоединен жгут 3 для подключения электродов.

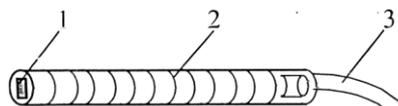


Рис. 3.14. Датчик Холла

В отсутствии магнитного поля ($B = 0$) $\Delta\varphi_x$ должна быть равна нулю, но вследствие ряда факторов это не выполняется. Погрешность измерения ЭДС Холла $\delta\varphi_x$ указана на кассете ФПЭ-04, в которой находится исследуемый соленоид.

Электрическая схема установки показана на рис. 3.15.

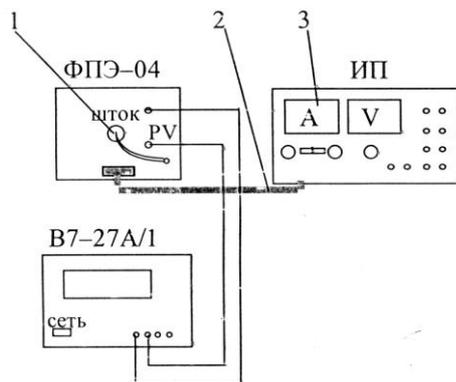


Рис. 3.15. Схема установки

Соленоид (ФПЭ-04) посредством кабеля 2 подключается к источнику питания (ИП). Ток через соленоид фиксируется амперметром 3. Перемещая шток 1 датчика Холла вдоль оси соленоида, измеряют ЭДС Холла с помощью цифрового вольтметра В7-27А/1.

Параметры установки: толщина датчика Холла в направлении магнитного поля $h = 0,2$ мм; управляющий ток датчика Холла $i_d = 90$ мА; число витков соленоида $N = 3300$; длина соленоида $L = 0,18$ м; диаметр соленоида $D = 0,1$ м.

Порядок выполнения работы

Задание 1

Определение зависимости магнитной индукции в средней точке на оси соленоида и калибровка датчика Холла

1. Собрать схему, изображенную на рис. 3.15. Для этого гнезда на лицевой панели кассеты ФПЭ-04 соединить с соответствующими гнездами цифрового вольтметра. Поставить шток с датчиком Холла в среднее положение на оси соленоида («0» по шкале штока).

2. Включить источник питания и цифровой вольтметр в сеть (220В). Измерить ЭДС Холла $\Delta\varphi_x$ в средней точке соленоида для токов 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 А. Полученные результаты занести в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Таблица измерений и результатов

№ п/п	i_a, A	$\Delta\varphi_x, \text{В}$	$B_0, \text{Тл}$	$R_x, \text{Ом}\times\text{м/Тл}$	$\bar{R}_x, \text{Ом}\times\text{м/Тл}$
1	0,5				
2	1,0				
3	1,5				
4	2,0				

3. Вычислить индукцию B_0 магнитного поля в центре соленоида по формуле (3.33).

4. Для каждого измерения определить значение постоянной Холла из формулы (3.37):

$$R_x = \frac{\Delta\varphi_x h}{i_d B_0}.$$

Значения управляющего тока через датчик i_d и ширины датчика h приведены в описании экспериментальной установки.

6. Найти среднее арифметическое значение постоянной Холла \bar{R}_x .

7. Построить графики зависимостей индукции магнитного поля и ЭДС Холла от тока в соленоиде: $B_0 = f(i_d)$ и $\Delta\varphi_x = f(i_d)$.

Задание 2

Исследование изменения индукции магнитного поля вдоль оси соленоида

1. Установить величину тока в соленоиде $i_A = 1$ А.
2. Перемещая шток с датчиком Холла вдоль оси соленоида с интервалом $\Delta x = 2$ см, измерять ЭДС Холла. Результаты измерений занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Таблица измерений и результатов

Δx , см	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
$\Delta\varphi_x$, В											
B , Тл											

3. Вычислить значение индукции магнитного поля в соленоиде для каждого положения датчика Холла из формулы (3.37)

$$B = \frac{h\Delta\varphi_x}{i_d R_x}.$$

4. Построить график зависимости индукции магнитного поля от координаты вдоль оси соленоида \ddot{e} . Вид графика показан на рис. 3.12.

Контрольные вопросы

1. Записать и пояснить закон Био-Савара-Лапласа.
2. Вывести формулу для расчета индукции магнитного поля на оси кругового витка с током.
3. Вывести формулу для расчета индукции магнитного поля на оси соленоида.
4. В чем заключается эффект Холла?
5. Объяснить полученные в работе экспериментальные зависимости.

Лабораторная работа 3.4 ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций, материалом, размещённым на медиасервере ВГУЭС, ниже расположенной теоретической частью работы и учебником [1], §§ 149, 150.

Цель работы: изучение вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре, состоящем из резистора R , катушки индуктивности L , и конденсатора C .

Теория метода и описание установки

Гармонические функции (напряжение, ток, ЭДС)

Три способа отображения величин, изменяющихся гармонически

1. Аналитический (формулой);
2. Графический (графиком во времени);
3. Вращающимся в плоскости радиус-вектором.

Рассмотрим все три способа на примере синусоидально изменяющегося напряжения.

Аналитический способ (формулой)

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U). \quad (3.38)$$

Исключительно важно знать и понимать, что означают величины u , U_m , ω , f , T , ψ_U !

u – мгновенное значение напряжения в вольтах (значение в данный момент времени t);

U_m – амплитудное значение напряжения в вольтах;

$\omega = 2\pi f$ – круговая (угловая) частота, измеряется в рад/с (радиан деленный на секунду) или проще с^{-1} ;

f – частота в герцах (Гц), $f = \frac{1}{T}$;

T – период колебаний. Одному периоду колебаний соответствует угол 2π радиан или 360° ;

t – время в секундах;

ωt – это произведение измеряется в угловых единицах (в радианах или в градусах);

ψ_U – начальная фаза напряжения. Измеряется в радианах или в градусах ($1 \text{ рад} = 57,32^\circ$).

Графический способ

На рис. 3.16 показано синусоидально изменяющееся напряжение с начальной фазой ψ_U .

Сравните аналитический и графический способы отображения синусоидальной величины.

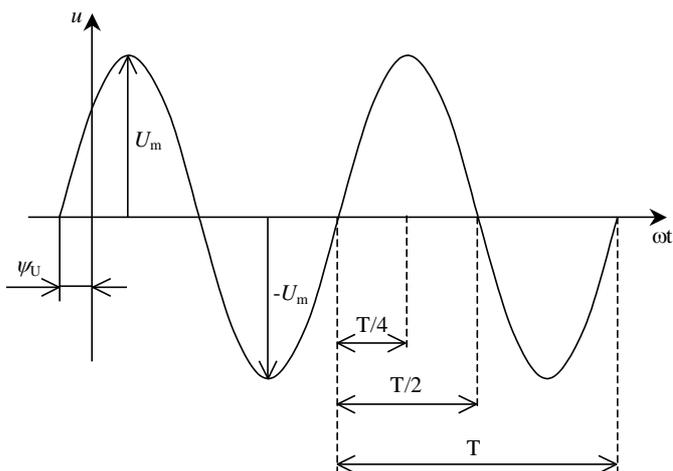


Рис. 3.16. График гармонической (синусоидальной) величины

Изображение синусоидально изменяющегося напряжения вращающимся в плоскости радиус-вектором

На рис. 3.17 показано отображение вращающимся радиус вектором синусоидально изменяющегося напряжения с начальной фазой ψ_U .

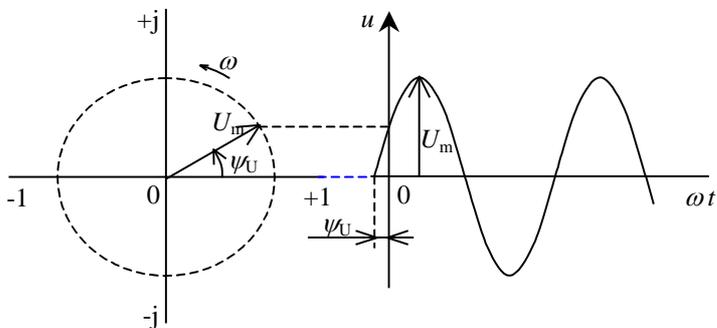


Рис. 3.17. Синусоида напряжения с начальной фазой ψ_U

Вращающийся против часовой стрелки с угловой частотой ω радиус-вектор длины U_m , описывает окружность (показана пунктиром), которой соответствует синусоида, показанная справа. Начало отсчёта в данном случае ведётся от положения радиус-вектора повернутого на угол ψ_U (началь-

ная фаза) от горизонтальной (вещественной) оси, обозначенной как -1 и $+1$. Вертикальная (мнимая) ось обозначена как $-j$ и $+j$.

Сравните все три способа отображения синусоидально изменяющейся величины. Обязательно найдите соответствие их друг другу.

Сдвиг фаз

На рис. 3.18 показаны напряжение и ток, сдвинутые по фазе на угол φ . Оба вектора изображающие напряжение и ток вращаются с одинаковой частотой ω и, следовательно, неподвижны друг относительно друга. Угол между векторами является углом сдвига фаз φ между напряжением и током. Угол сдвига фаз φ отображён и на правой части рисунка там, где изображены синусоиды напряжения и тока. Угол всегда отсчитывается от тока. Если он отсчитывается против часовой стрелки, то считается положительным, как на рис. 3.18.

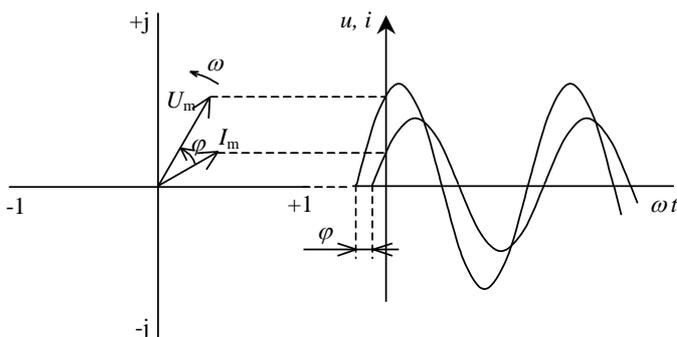


Рис. 3.18. Две синусоиды, сдвинутые на угол φ

Резистивный R , индуктивный L , ёмкостный C элементы при синусоидальном воздействии

Резистивный элемент

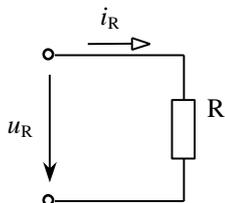


Рис. 3.19. Схема резистивного элемента в цепи электрического тока

Пусть напряжение, приложенное к резистивному элементу

$$u_R = U_{Rm} (\sin \omega t + \psi_{UR}) . \quad (3.39)$$

Тогда ток через резистивный элемент

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{U_{Rm}}{R} \sin(\omega t + \psi_{UR}) = I_{Rm} \sin(\omega t + \psi_{IR}) , \quad (3.40)$$

$$i_R = I_{Rm} \sin(\omega t + \psi_{IR}) , \quad (3.41)$$

где $\frac{U_{Rm}}{R} = I_{Rm}$;

$\psi_U = \psi_I$ и, следовательно, сдвиг фаз между напряжением и током равен нулю

$$\varphi = \psi_{UR} - \psi_{IR} = 0 . \quad (3.42)$$

Напряжение u_R и ток i_R совпадают по фазе (изменяются синфазно).

Векторное и графическое изображение напряжения и тока в резистивном элементе показаны на рис. 3.20.

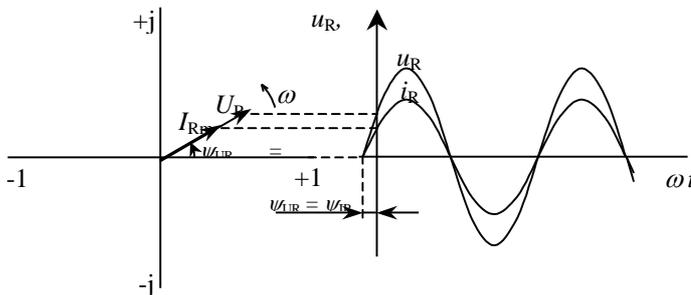


Рис. 3.20. Изображение тока и напряжения на сопротивлении R вращающимися радиус-векторами (слева) и графиком (справа)

Амплитуды напряжения и тока резистивного элемента в комплексной форме записи:

$\underline{U}_{Rm} = U_{Rm} e^{j\psi_{UR}}$ – комплексное значение напряжения на сопротивлении R ;

$\underline{I}_{Rm} = I_{Rm} e^{j\psi_{IR}}$ – комплексное значение тока в сопротивлении R ;

$e^{j\psi}$ – обозначает поворот вектора на угол ψ ;

$$\underline{U}_{Rm} = R \cdot \underline{I}_{Rm} . \quad (3.43)$$

Индуктивный элемент

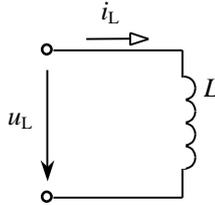


Рис. 3.21. Схема индуктивного элемента в цепи электрического тока

Пусть ток в индуктивном элементе

$$i_L = I_{Lm} (\sin \omega t + \psi_{iL}). \quad (3.44)$$

Тогда напряжение на индуктивном элементе

$$\begin{aligned} u_L &= L \frac{di_L}{dt} = L \frac{dI_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{iL})}{dt} = \omega L I_{Lm} \cos(\omega t + \psi_{iL}) = \\ &= X_L I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{iL} + \frac{\pi}{2}); \\ u_L &= X_L I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{iL} + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{uL} + \frac{\pi}{2}); \\ u_L &= U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{uL} + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{uL}), \end{aligned} \quad (3.45)$$

где $X_L = \omega L = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление,

$U_{Lm} = X_L I_{Lm}$ – амплитуда напряжения на индуктивном сопротивлении,

$\psi_{uL} = \psi_{iL} + \frac{\pi}{2}$ – начальная фаза напряжения на индуктивности.

Из полученных выражений видно:

1. Что индуктивное сопротивление линейно зависит от частоты. Чем больше частота, тем больше сопротивление.

2. Напряжение на индуктивности по фазе опережает на $\frac{\pi}{2}$ (на 90°) ток в индуктивности. Можно это же самое сказать иначе: ток в индуктивности по фазе отстает от напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (на 90°).

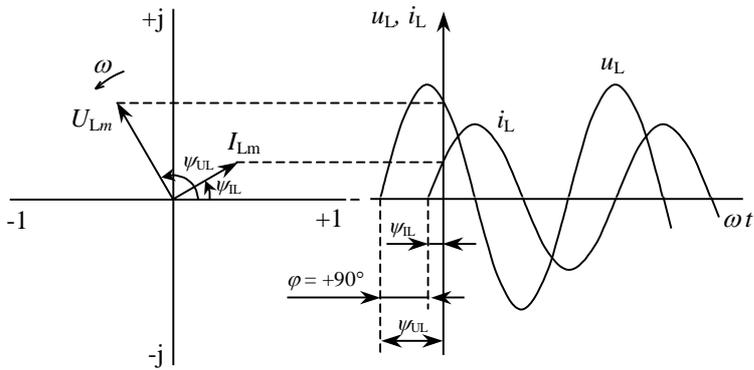


Рис. 3.22. Изображение тока и напряжения на индуктивности L вращающимися радиус-векторами (слева) и графиком (справа)

Амплитуды напряжения и тока индуктивного элемента в комплексной форме записи:

$$\underline{U}_{L_m} = U_{L_m} e^{j\psi_{U/L}} - \text{комплексное напряжение на индуктивности } L;$$

$$\underline{I}_{L_m} = I_{L_m} e^{j\psi_{I/L}} - \text{комплексное значение тока в индуктивности } L;$$

где j – мнимая единица (в математике обозначается как i , а это обозначение в электротехнике занято обозначением тока).

$$\underline{U}_{L_m} = jX_L \cdot \underline{I}_{L_m} = X_L e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \underline{I}_{L_m}. \quad (3.45)$$

Ёмкостный элемент

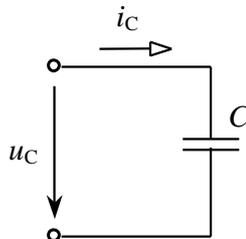


Рис. 3.23. Схема ёмкостного элемента в цепи электрического тока

Пусть напряжение на ёмкостном элементе

$$u_C = U_{C_m} (\sin \omega t + \psi_{U_C}). \quad (3.46)$$

Вывод формул соотношения напряжения и тока в емкостном элементе (конденсаторе)

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{dU_{cm} \sin(\omega t + \psi_{uc})}{dt} = \omega C U_{cm} \cos(\omega t + \psi_{uc}) =$$

$$= \omega C U_{cm} \sin(\omega t + \psi_{uc} + \frac{\pi}{2});$$

$$i_c = \omega C U_{cm} \sin(\omega t + \psi_{uc} + \frac{\pi}{2}) = I_{cm} \sin(\omega t + \psi_{uc} + \frac{\pi}{2}); \quad (3.47)$$

$$I_{cm} = \omega C U_{cm};$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega C} I_{cm} = X_c I_{cm},$$

где $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ – емкостное сопротивление,

$I_{cm} = \omega C U_{cm}$ – амплитуда тока в емкостном сопротивлении,

$\psi_{ic} = \psi_{uc} + \frac{\pi}{2}$ – начальная фаза тока в емкости.

Из полученных выражений видно:

1. Что емкостное сопротивление зависит от частоты. Чем больше частота, тем меньше сопротивление.
2. Ток в емкости по фазе опережает на $\frac{\pi}{2}$ (на 90°) напряжение на емкости. Можно это же самое сказать иначе: напряжение на емкости по фазе отстает от тока в емкости на $\frac{\pi}{2}$ (на 90°).

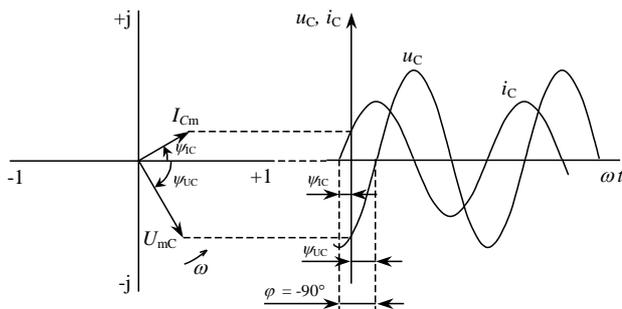


Рис. 3.24. Изображение тока и напряжения на ёмкости C вращающимися радиус-векторами (слева) и графиком (справа)

Амплитуды напряжения и тока ёмкостного элемента в комплексной форме записи:

$$\underline{U}_{C_m} = U_{C_m} e^{j\omega t_c} - \text{комплексное напряжение на ёмкости } C;$$

$$\underline{I}_{C_m} = I_{C_m} e^{j\omega t_c} - \text{комплексное значение тока в ёмкости } C;$$

$$\underline{U}_{C_m} = -jX_C \cdot \underline{I}_{C_m} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} \cdot \underline{I}_{C_m}. \quad (3.48)$$

Цепь RLC при гармоническом воздействии

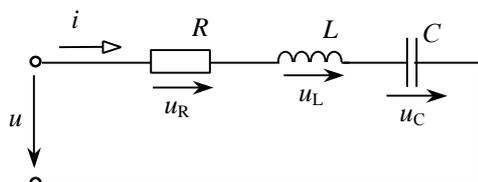


Рис. 3.25. Схема последовательной цепи RLC

Согласно второму закону Кирхгофа для мгновенных значений имеем:

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (3.49)$$

где $u_R = R \cdot i$ – мгновенное напряжение на сопротивлении R ,

$$u_L = L \frac{di}{dt} - \text{мгновенное напряжение на индуктивности } L,$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt - \text{мгновенное напряжение на ёмкости } C.$$

Тогда

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt. \quad (3.50)$$

Если пользоваться комплексными изображениями амплитуд гармонических величин (тока и напряжений), то схема будет выглядеть так, как показано на рис. 3.26.

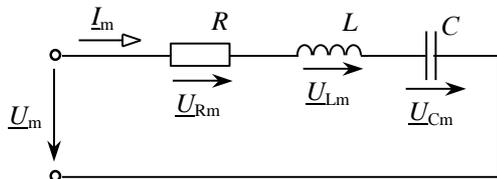


Рис. 3.26. Схема последовательно включенных элементов R , L и C

Согласно второму закону Кирхгофа для комплексных значений имеем:

$$\underline{U}_m = \underline{U}_{Rm} + \underline{U}_{Lm} + \underline{U}_{Cm}, \quad (3.51)$$

где \underline{U}_m – комплексное амплитудное значение входного напряжения;

\underline{I}_m – комплексное амплитудное значение входного тока;

$\underline{U}_{Rm} = R\underline{I}_m$ – комплексное амплитудное значение напряжения на сопротивлении R ;

$\underline{U}_{Lm} = jX_L\underline{I}_m$ – комплексное амплитудное значение напряжения на индуктивности L ;

$\underline{U}_{Cm} = -jX_C\underline{I}_m$ – комплексное амплитудное значение напряжения на ёмкости C .

Тогда

$$\begin{aligned} \underline{U}_m &= R\underline{I}_m + jX_L\underline{I}_m - jX_C\underline{I}_m = (R + jX_L - jX_C)\underline{I}_m = \\ &= [R + j(X_L - X_C)]\underline{I}_m = (R + jX)\underline{I}_m = \underline{Z}\underline{I}_m, \\ \underline{U}_m &= \underline{Z}\underline{I}_m; \end{aligned} \quad (3.52)$$

где $\underline{Z} = R + jX$ – полное комплексное сопротивление последовательной цепи R, L, C ;

$X = X_L - X_C$ – суммарное реактивное сопротивление последовательной цепи R, L, C .

Преобразуем сопротивление \underline{Z} в показательную форму

$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + X^2} e^{j \arctg \frac{X}{R}} = Z e^{j\varphi_Z}. \quad (3.53)$$

Поделив напряжение на сопротивление, получаем выражение для тока

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} = \frac{U_m e^{j\psi_U}}{Z e^{j\varphi_Z}} = \frac{U_m}{Z} e^{j(\psi_U - \varphi_Z)}. \quad (3.54)$$

Исходя из вышеизложенного, получим выражения для амплитуды тока и для угла сдвига фаз между током и входным напряжением

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}; \quad (3.55)$$

При резонансе ($\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$) выражение примет вид $I_{0m} = \frac{U_m}{R}$,

где I_{0m} – амплитудное значение тока при резонансе.

Примем начальную фазу входного напряжения ψ_U равной нулю, тогда

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (3.56)$$

Полученным выражениям при разных добротностях соответствуют графики, показанные на рис. 3.27.

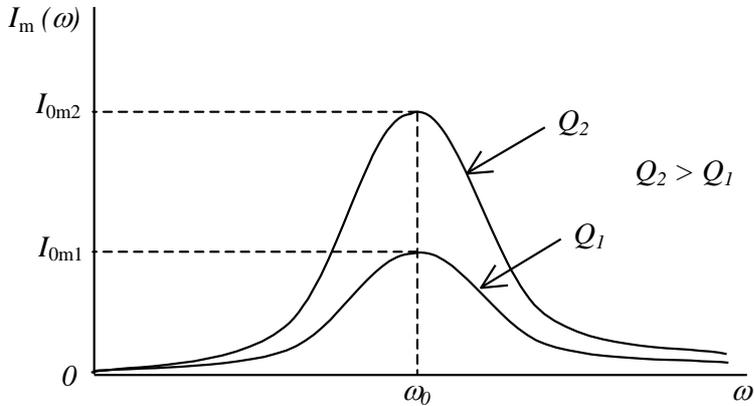


Рис. 3.27. Зависимость тока от частоты при различных добротностях

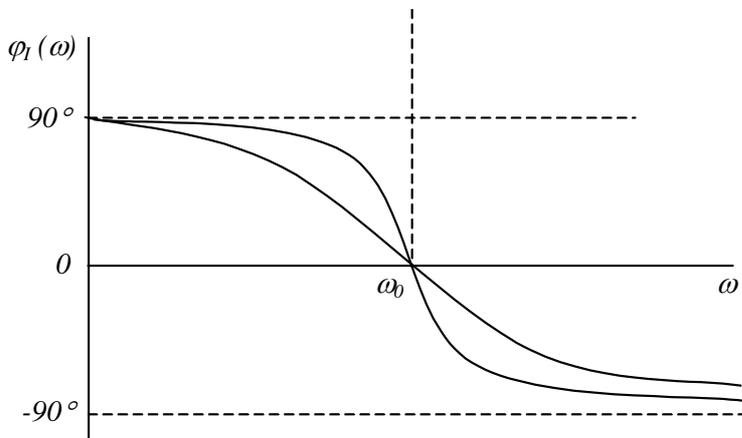


Рис. 3.28. Зависимость сдвига фаз от частоты при различных добротностях

Резонансная частота находится из равенства индуктивного и ёмкостного сопротивлений

$$X_L = X_C = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} ; \quad (3.57)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} . \quad (3.58)$$

Подставив формулу ω_0 в формулы сопротивлений X_L и X_C при резонансной частоте, получим формулу характеристического сопротивления последовательного колебательного контура

$$X_L = X_C = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Добротность контура определяется выражением

$$Q = \frac{\rho}{R} . \quad (3.59)$$

Отметим, что чем больше добротность Q , тем больше значение тока при резонансе I_0 и тем круче кривая зависимости угла сдвига фаз от частоты.

По резонансной кривой можно определить полосу пропускания контура $\Delta\omega = \omega_{\text{в}} - \omega_{\text{н}}$. Обычно её определяют по уровню $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ от резонансного значения тока I_0 (рис. 3.29).

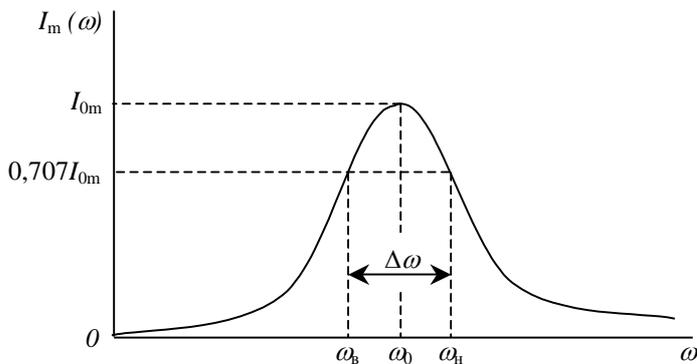


Рис. 3.29. Определение полосы пропускания по графику $I_m(\omega)$

По полосе пропускания можно определить добротность контура

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{f_0}{\Delta f} . \quad (3.60)$$

Использование осциллографа (фигур Лиссажу) для измерения угла сдвига фаз

Пусть имеются два синусоидальных напряжения одинаковой частоты ω . Подадим эти напряжения на вертикальные и горизонтальные пластины осциллографа. Смещения луча по горизонтали x и по вертикали y будут пропорциональны этим напряжениям

$$x = X_0 \sin \omega t ; \quad (3.61)$$

$$y = Y_0 \sin(\omega t + \varphi) ; \quad (3.62)$$

где X_0 и Y_0 – амплитуды смещения луча, пропорциональные амплитудам напряжения и коэффициентам усиления соответствующих каналов осциллографа;

φ – сдвиг фаз между напряжениями.

Исключив из этих уравнений время, получим

$$\left(\frac{x}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{Y_0}\right)^2 - \frac{2xy}{X_0 Y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi . \quad (3.63)$$

Полученное выражение является уравнением эллипса, описываемого электронным лучом на экране осциллографа. Выберем коэффициенты усиления вертикального и горизонтального каналов осциллографа такими, чтобы $X_0 = Y_0$. Тогда

$$x_2 + y_2 - 2xy \cos \varphi = X_0^2 \sin^2 \varphi . \quad (3.64)$$

Получилось уравнение эллипса, оси которого составляют угол 45° с осями координат. При $\varphi = 0^\circ$ эллипс вырождается в прямую $x = y$, при $\varphi = 90^\circ$ – в круг радиуса X_0 . Для точки М эллипса $y = x$, следовательно,

$$a^2 = x^2 + y^2 = 2x^2 . \quad (3.65)$$

Уравнение $x_2 + y_2 - 2xy \cos \varphi = X_0^2 \sin^2 \varphi$ для этой точки примет вид

$$2x^2 - 2x^2 \cos \varphi = X_0^2 \sin^2 \varphi ; \quad (3.66)$$

$$2x^2(1 - \cos \varphi) = X_0^2 \sin^2 \varphi ;$$

$$a^2 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} = X_0^2 4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cos^2 \frac{\varphi}{2} ;$$

откуда

$$a^2 = 2X_0^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (3.67)$$

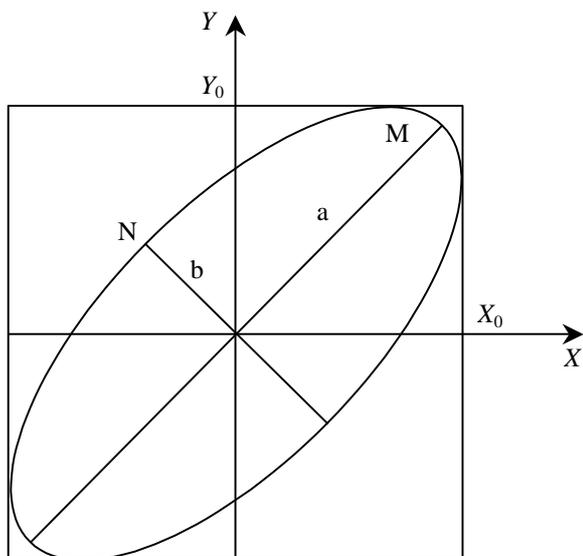


Рис. 3.30. Эллипс (фигура Лиссажу) на экране осциллографа

Аналогично для точки N эллипса получим

$$b^2 = 2X_0^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (3.68)$$

Из вышеприведённых выражений получим

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{b}{a}. \quad (3.69)$$

Таким образом, для измерения сдвига фаз между напряжениями одинаковой частоты достаточно измерить полуоси a и b эллипса, вписанного в квадрат на экране осциллографа. При $\varphi = 0$ эллипс вырождается в прямую, что позволяет по фигурам Лиссажу определять сдвиг фаз между входным напряжением и током последовательного колебательного контура. При этом на вход Y осциллографа подаётся напряжение с резистивного элемента (в нашем случае с R_1), пропорциональное току, а на вход X – входное напряжение.

Методика и порядок измерений

На рис. 3.31 показана лабораторная установка для исследования резонансных явлений.

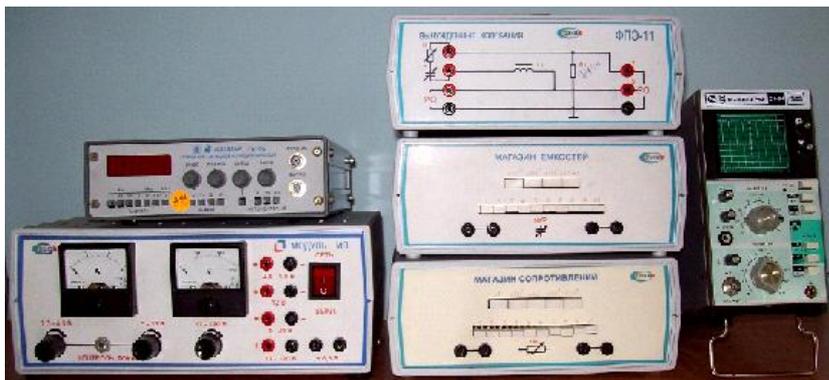


Рис. 3.31. Фото лабораторной установки для исследования резонансных явлений

На рис. 3.32 показана структурная схема установки для снятия резонансных кривых.

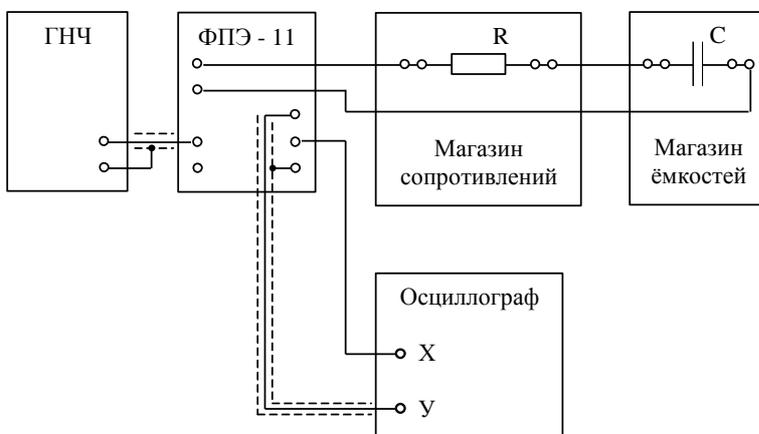


Рис. 3.32. Структурная схема установки для снятия резонансных кривых

Назначение блоков. Генератор низких частот ГНЧ задаёт регулируемое напряжение синусоидальной формы с регулируемой амплитудой. Блок ФПЭ-11 содержит катушку индуктивности L , сопротивление R_1 , с помощью которого можно измерять ток в контуре, и выводы для подсоединения генератора, осциллографа и магазинов сопротивлений и ёмкостей. Магазин сопротивлений (МС) содержит набор резисторов с различными сопротивлениями. Магазин ёмкостей (МЁ) содержит набор конденсаторов различных ёмкостей. Генератор и осциллограф соединяются с блоком ФПЭ-11 экранированными проводами (провода, окружённые пунктиром на рис. 3.32). Остальные соединения выполняются обычными проводами.

На рис. 3.33 показана принципиальная электрическая схема установки.

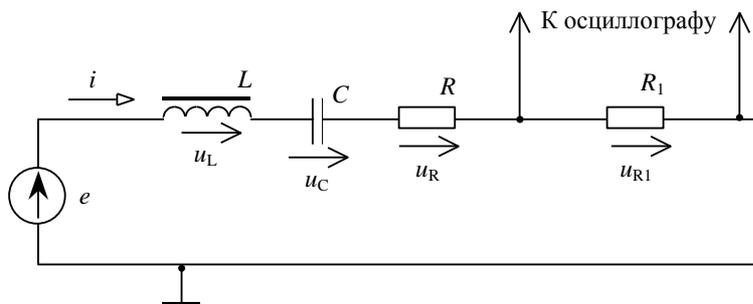


Рис. 3.33. Принципиальная электрическая схема установки

Задание 1. Получить зависимость амплитуды тока в контуре от частоты питающего контур синусоидального напряжения при трёх значениях сопротивления R ($R = 0$, $R = 500$ Ом, $R = 3000$ Ом).

Последовательность выполнения

1. Установить переключателями магазина ёмкостей $C = 3 \cdot 10^{-3}$ мкФ и переключателями магазина сопротивлений $R = 0$.
2. Используя приблизительное значение индуктивности $L = 100$ мГн, рассчитать резонансную частоту контура по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.70)$$

3. Ознакомиться с работой генератора низких частот и электронного осциллографа в режиме измерения амплитуды синусоидального напряжения.

4. Подготовить приборы к работе:
 - Установить частоту генератора 2 кГц, величину выходного напряжения 1 В.
 - Установить частоту развертки осциллографа, удобную для наблюдения сигналов (напряжений) с частотой 2–16 кГц.
 - Установить усиление по вертикальной оси (ось Y) осциллографа таким, чтобы было возможно измерять напряжение до 1 В.
5. Включить лабораторный стенд и приборы. Напряжение генератора установить равным 0,8 В. Это значение при всех измерениях в части 1 поддерживать неизменным.
6. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение синусоиды. Измерить эту амплитуду в вольтах. Результаты внести в табл. 3.7.

Таблицы 3.7...3.9

f , кГц										
U_{R1} , В										
I , мА										

7. Измерить амплитуды напряжения при других частотах в диапазоне от 2 до 16 кГц. В районе резонанса ($f_0 \pm 1$ кГц) измерения производить с интервалом 0,2 кГц, в остальном с интервалом 2 кГц. Результаты также занести в табл. 3.7.

8. Рассчитать по формуле $I_m = \frac{U_{R1m}}{R_1}$ и внести в таблицу 4.1 амплитуды тока в колебательном контуре для каждого измерения по формуле.

9. Установить сопротивление магазина $R = 500$ Ом и выполнить пункты 5...8. Результаты занести в табл. 3.8, аналогичную табл. 3.7.

10. Установить сопротивление магазина $R = 3000$ Ом и выполнить пункты 5...8. Результаты занести в табл. 3.9, аналогичную табл. 3.7.

11. Построить на одной системе координат все три полученные зависимости $I_m(f)$.

12. По графикам снятых при $R = 0$ и $R = 500$ определить полосу пропускания Δf и рассчитать значения добротности контура по формуле

$$Q \approx \frac{f_0}{\Delta f}. \quad (3.71)$$

Задание 2. Снять зависимость резонансной частоты от ёмкости C . Последовательность выполнения

1. Установить сопротивление $R = 0$, ёмкость $C = 1 \cdot 10^{-3}$ мкФ.

2. Выключить развертку осциллографа по оси X . На экране осциллографа появится эллипс (рис. 3.33).

3. Изменяя частоту генератора, добиться превращение эллипса в прямую линию, расположенную примерно под углом 45° к оси X . При необходимости изменять усиление по оси Y . Если на экране осциллографа наблюдается прямая линия, это значит, что частота генератора равна резонансной частоте контура f_0 . Значение ёмкости и полученное значение частоты внести в табл. 3.10.

Таблица 3.10

$C \times 10^9 \Phi$									
$f_p, \text{Гц}$									
Z									

4. Произвести измерения f_0 при значениях ёмкости C в диапазоне от $C = 1 \cdot 10^{-3}$ мкФ до $C = 10 \cdot 10^{-3}$ мкФ с интервалом $1 \cdot 10^{-3}$ мкФ.

5. Вычислить значения Z по формуле

$$Z = \frac{1}{(2\pi f_0)^2} \cdot \quad (3.72)$$

6. Построить график зависимости Z от C . График должен представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 3.34).

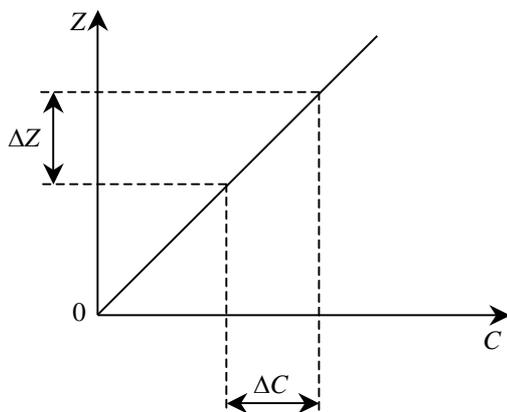


Рис. 3.34. График зависимости $Z(C)$

7. Рассчитать значение индуктивности катушки как тангенс угла наклона зависимости $Z = f(C)$

$$Z = \frac{\Delta Z}{\Delta C}. \quad (3.73)$$

Контрольные вопросы

1. Опишите явление резонанса в последовательном колебательном контуре.

2. Укажите основные параметры, характеризующие последовательный колебательный контур.

3. Выведите формулу резонансной частоты последовательного колебательного контура.

4. Выведите формулу характеристического сопротивления контура.

5. Укажите связь между напряжениями на реактивных элементах (элементы L и C) при резонансе, напряжением на резистивном элементе и добротностью контура.

6. Укажите, почему при увеличении частоты от нуля до бесконечности, ток в контуре сначала нарастает, а потом уменьшается.

7. Укажите, почему при увеличении резистивного сопротивления контура R , значение тока при частоте резонанса уменьшается.

8. Объясните, почему при увеличении резистивного сопротивления контура R , увеличивается полоса пропускания контура.

9. Объясните, почему при уменьшении величины ёмкости при неизменности остальных параметров контура, резонансная частота возрастает.

10. Выведите формулу для вычисления сдвига фаз между входным напряжением и током с помощью фигур Лиссажу.

4. ОПТИКА

Лабораторная работа 4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ МЕТОДОМ БЕССЕЛЯ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 165–168 или [2], т. 2, §§ 112, 115–118, т. 3, §§ 8–12). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение законов геометрической оптики, оптических систем, определение фокусных расстояний линз.

Теория метода и описание установки

Краткая теория и метод измерений. Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя криволинейными или криволинейной и плоской поверхностями. Обычно применяют линзы, поверхности которых имеют сферическую форму. Прямая, проходящая через центры преломляющих поверхностей линзы, называется ее оптической осью, точки пересечения оптической оси с преломляющими поверхностями – вершинами линзы, а расстояние между точками пересечения – толщиной линзы. Если толщина линзы гораздо меньше радиусов кривизны преломляющих поверхностей, она называется тонкой.

Линзы бывают собирающими и рассеивающими. Собирающая линза в середине толще, чем у краев, рассеивающая, наоборот, в середине тоньше. Примеры собирающих и рассеивающих линз и их условные обозначения приведены на рис. 4.1.

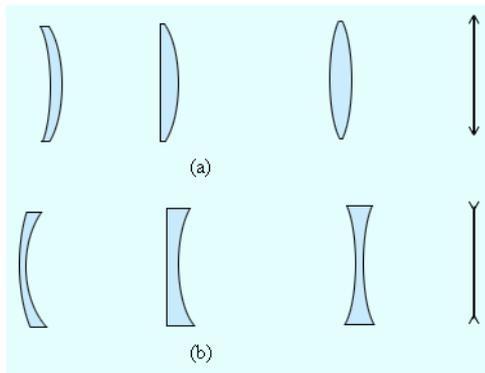


Рис. 4.1. Виды собирающих (а) и рассеивающих (б) линз и их условные обозначения

В случае тонких линз можно приближенно считать, что оптическая ось пересекается с линзой в одной точке, которую называют оптическим центром линзы. Луч света, проходя через оптический центр линзы, не меняет своего направления. Все прямые, проходящие через оптический центр линзы, называются побочными оптическими осями.

Если на линзу направить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после прохождения через линзу лучи (или их продолжения) соберутся в одной точке F , которая называется **главным фокусом** линзы. У тонкой линзы имеются два главных фокуса, расположенных симметрично относительно линзы на главной оптической оси. У собирающих линз фокусы действительные, у рассеивающих – мнимые. Пучки лучей, параллельных одной из побочных оптических осей, также фокусируются после прохождения через линзу в точку F' , которая расположена при пересечении побочной оси с **фокальной плоскостью** линзы, то есть плоскостью перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус (рис. 4.2). Расстояние между оптическим центром линзы O и главным фокусом F называется фокусным расстоянием. Оно обозначается той же буквой F .

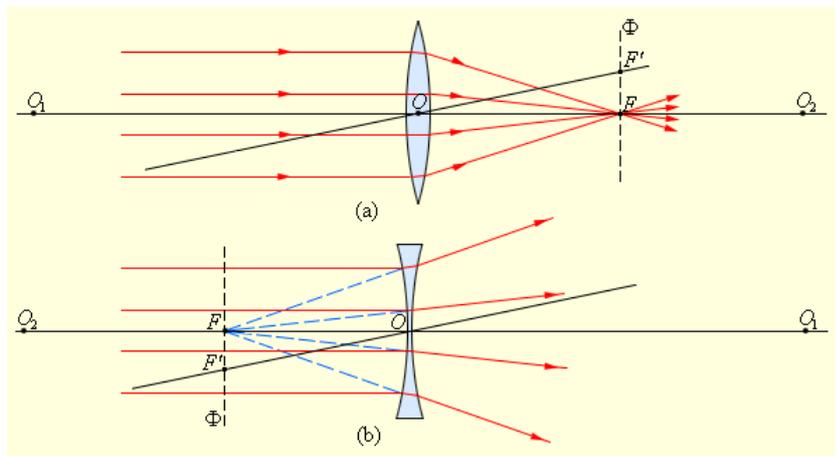


Рис. 4.2. Преломление параллельного пучка лучей в собирающей (а) и рассеивающей (б) линзах

Основное свойство линз – способность давать **изображения предметов**. Изображения бывают **прямыми** и **перевернутыми**, **действительными** и **мнимыми**, **увеличенными** и **уменьшенными**.

Положение изображения и его характер можно определить с помощью геометрических построений. Для этого используют свойства некоторых стандартных лучей, ход которых известен. Это лучи, проходящие

через оптический центр или один из фокусов линзы, а также лучи, параллельные главной или одной из побочных оптических осей. Примеры таких построений представлены на рис. 4.3, 4.4.

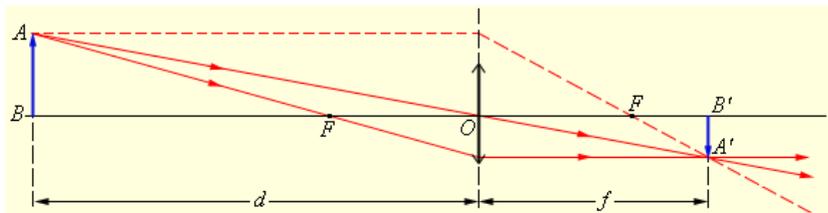


Рис. 4.3. Построение изображения в собирающей линзе

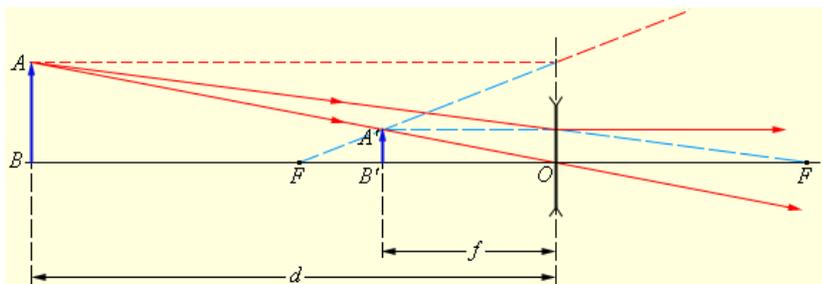


Рис. 4.4. Построение изображения в рассеивающей линзе

Расстояние от предмета до линзы (на рис. 4.3, 4.4 оно обозначено буквой d) называется расстоянием предмета, а расстояние от линзы до изображения (f на рис. 4.3, 4.4) – расстоянием изображения. Эти расстояния вместе с фокусным расстоянием подчиняются формуле тонкой линзы

$$\pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F} = D, \quad (4.1)$$

где величина D оптической силой линзы. Выбор знаков в (4.1) осуществляется следующим образом: для собирающей линзы, действительных предмета и изображения используется знак плюс, для рассеивающей линзы, мнимого предмета и изображения – знак минус.

Изображения, получаемые при помощи линз, принято характеризовать при помощи линейного увеличения, которое определяется как отношение линейных размеров изображения h' и предмета h

$$\Gamma = \frac{h'}{h}. \quad (4.2)$$

Фокусное расстояние собирающей линзы может быть определено непосредственно при помощи источника света, линзы, экрана и инструмента, измеряющего расстояния. Для рассеивающей линзы такой метод не подходит, поскольку изображение, получаемое с помощью рассеивающей линзы, является мнимым. Удобным методом определения фокусных расстояний, в том числе и рассеивающих линз, является метод Бесселя.

С одной стороны от собирающей линзы на ее оптической оси поместим предмет, действительное изображение которого будем получать на экране, расположенном с другой стороны от линзы. Расстояние L между предметом и экраном зафиксируем. Если оно достаточно велико, существуют два положения линзы, при которых на экране получаются четкие изображения предмета – уменьшенное и увеличенное. Определим эти положения, используя формулу (4.1) и условие

$$|s| + s' = L. \quad (4.3)$$

Решая совместно уравнения (4.1), (4.3), получаем квадратное уравнение, корни которого могут быть найдены по формуле

$$|s|_{1,2} = \frac{L}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - LF}. \quad (4.4)$$

Из (4.4) следует, что расстояние между двумя положениями линзы, которым соответствуют увеличенное и уменьшенное изображения предмета, равно разности расстояний d_1 и d_2 , и может быть найдено по формуле

$$A = |s|_1 - |s|_2 = 2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - Lf}. \quad (4.5)$$

Решая (4.5) относительно фокусного расстояния, получаем

$$f = \frac{L^2 - A^2}{4L}. \quad (4.6)$$

Непосредственно с помощью метода Бесселя определить фокусное расстояние рассеивающей линзы невозможно, так как такая линза не дает действительного изображения предмета. Однако, если рассеивающую линзу вплотную сложить с более сильной собирающей линзой, получится собирающая оптическая система, дающая действительное изображение предмета. Определяя фокусное расстояние собирающей линзы и оптической системы из двух линз, можно найти фокусное расстояние рассеивающей линзы, воспользовавшись тем обстоятельством,

что оптическая сила системы тонких линз равна сумме оптических сил слагаемых

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{f_+} + \frac{1}{f_-}, \quad (4.7)$$

откуда следует

$$f_- = \frac{f_c f_+}{f_+ - f_c}. \quad (4.8)$$

Описание лабораторной установки

Для имитации светящегося предмета в лабораторной работе применяется двумерная дифракционная решетка, освещаемая лазером. Из-за дифракции лазерный пучок за решеткой расщепляется на множество расходящихся лучей, которые дают характерное крестообразное расположение ярких пятен на экране. Исследуемая линза или система линз позволяет свести расходящиеся после решетки лучи в пятно-изображение. Решетка и линзы устанавливаются в оправках, перемещаемых вдоль стержней оптической скамьи. Каждая из линз может быть независимо удалена из оптического тракта. Экран закреплен на специальном рейтере. Оптическая скамья снабжена метровой шкалой (лента рулетки), позволяющей определять положение элементов.

Порядок выполнения работы и обработки результатов

1. Убрать линзы из оптического тракта. Включить лазер. Убедиться, что центральное дифракционное пятно находится в центре экрана и имеет круглую форму.

2. Установить решетку и экран на расстоянии, указанном преподавателем и определить их координаты x и x' по шкале оптической скамьи.

3. Установить в тракт первую (собирающую) линзу и, перемещая ее, найти координаты x_1 и x_2 положений, при которых линза сводит лучи на экране в увеличенное и уменьшенное пятно-изображение.

4. Установить в тракт вторую (рассеивающую) линзу. Повторить измерения п. 3 для системы линз.

5. Вычислить расстояние L по формуле

$$L = x' - x, \quad (4.9)$$

где x' и x – координаты решетки и экрана соответственно.

6. Определить расстояние A для первой линзы по формуле

$$A = \bar{x}_2 - \bar{x}_1. \quad (4.10)$$

7. Определить расстояние A для системы линз по формуле (4.10).

8. Определить фокусные расстояния собирающей линзы и системы линз по формуле (4.6).
9. Рассчитать фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле (4.8).
10. Результаты измерений и расчетов оформить в виде таблицы.
11. Сделать выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип Ферма, законы отражения и преломления света.
2. Что называется оптической системой?
3. Что такое изображение? По каким признакам характеризуют изображения, получаемые в оптических системах?
4. Дайте определение линзы. Какие линзы называются тонкими? Приведите классификацию линз по их геометрической форме и получаемым с их помощью изображениям. Охарактеризуйте такие понятия как главная и побочная оптические оси, вершина линзы, фокальная плоскость и фокус линзы.
5. Опишите методику построения изображений в тонких линзах. Сформулируйте понятия фокусного расстояния, расстояния предмета и изображения. Дайте определение оптической силы линзы.
6. Приведите формулы тонкой линзы и линейного увеличения тонкой линзы, сформулируйте правило знаков.
7. Опишите метод Бесселя измерения фокусных расстояний линз и систем линз.

Лабораторная работа 4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ЛИНЗ МЕТОДОМ ОТРЕЗКОВ ПРИ ПОМОЩИ ДВУХЛИНЗОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 3, §§ 8–12 или [1], §§ 165, 166. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение законов геометрической оптики, оптических систем, определение фокусных расстояний линз.

Теория метода и описание установки

Краткая теория и метод измерений. Ознакомьтесь с описанием лабораторной работы 4.1, в котором приведены основные определения из курса геометрической оптики и свойства линз и линзовых систем.

В данной работе для определения фокусных расстояний линз используется метод отрезков, позволяющий определить фокусные рас-

стояния тонкой собирающей и рассеивающей линз по формуле тонкой линзы (4.11). В случае собирающей линзы ее передвигают вдоль оптической скамьи для получения четкого изображения предмета (увеличенного или уменьшенного), после чего измеряют расстояния предмета и изображения и вычисляют фокусное расстояние по формуле (4.11). Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы затрудняется тем, что она всегда дает только мнимое изображение предмета.

Для получения действительного изображения используется вспомогательная собирающая линза. Сначала для собирающей линзы получают четкое изображение предмета на экране и измеряют расстояние S_1 от линзы до экрана. Затем между собирающей линзой и экраном помещают рассеивающую линзу, передвигая тем самым действительное изображение на расстояние S_2 от собирающей линзы до экрана, делая точку S_1 мнимым источником (рис. 4.5). Измерение координат действительных изображений, получаемых до и после установки рассеивающей линзы, а также расстояния между линзами, позволяет определить расстояния предмета и изображения и по формуле тонкой линзы рассчитать фокусное расстояние рассеивающей линзы.

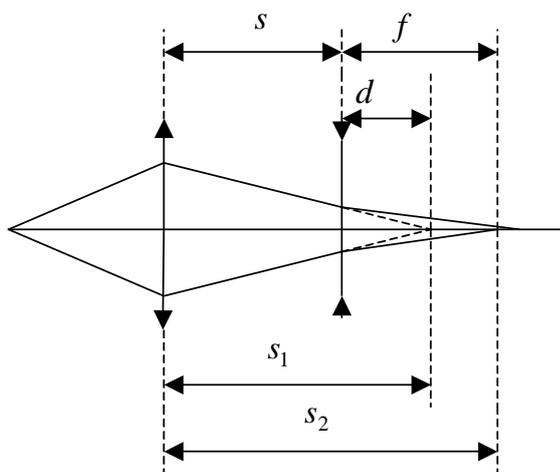


Рис. 4.5. Измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе источником света является осветитель, состоящий из пары светодиодов. Остальные элементы лабораторной установки совпадают с описанными в работе 4.1.

Порядок выполнения работы и обработки результатов

1. Для тонкой собирающей линзы провести измерение расстояний от осветителя до линзы d и от линзы до экрана f при ее передвижении вдоль оптической скамьи до получения четкого изображения излучающей площадки светодиодов на экране.

2. Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы провести измерения положений действительных изображений в случае собирающей линзы – s_1 и в случае двухлинзовой системы – s_2 , а также расстояние между линзами s .

3. Определить фокусное расстояние собирающей линзы по результатам измерений п. 1 по формуле тонкой линзы.

4. Определить фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле

$$-\frac{1}{F} = -\frac{1}{s_1 - s} + \frac{1}{s_2 - s}. \quad (4.11)$$

5. Оформить результаты измерений и расчетов в виде таблицы и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип Ферма, законы отражения и преломления света.

2. Что называется оптической системой?

3. Что такое изображение? По каким признакам характеризуют изображения, получаемые в оптических системах?

4. Дайте определение линзы. Какие линзы называются тонкими? Приведите классификацию линз по их геометрической форме и получаемым с их помощью изображениям. Охарактеризуйте такие понятия как главная и побочная оптические оси, вершина линзы, фокальная плоскость и фокус линзы.

5. Опишите методику построения изображений в тонких линзах. Сформулируйте понятия фокусного расстояния, расстояния предмета и изображения. Дайте определение оптической силы линзы.

6. Приведите формулы тонкой линзы и линейного увеличения тонкой линзы, сформулируйте правило знаков.

7. Опишите метод отрезков измерения фокусных расстояний линз и систем линз.

Лабораторная работа 4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ЩЕЛЯМИ В ОПЫТЕ ЮНГА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 3, § 17 или [1], §§ 172, 173). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение явления интерференции, определение расстояния между щелями в опыте Юнга.

Теория метода и описание установки

Краткая теория и метод измерений. Интерференцией света называется пространственное перераспределение светового потока, возникающее в результате наложения двух (или нескольких) когерентных световых волн. Интерференция относится к тем световым явлениям, которые объясняются в рамках волновой теории света. Основным теоретическим положением волновой теории является принцип Гюйгенса: каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение фронта волны в следующий момент времени. Волновым фронтом называется геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .

Необходимым условием интерференции волн является их когерентность, т.е. согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. Этому условию удовлетворяют монохроматические волны – неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты. Поскольку ни один реальный источник не дает строго монохроматического света, волны, излучаемые любыми независимыми источниками света, всегда некогерентны.

Предположим, что две монохроматические световые волны, накладываясь друг на друга, возбуждают в определенной точке пространства колебания одинакового направления

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad E_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (4.12)$$

где E_1 и E_2 – напряженности электрического поля, A_1 и A_2 – амплитуды складывающихся колебаний, φ_1 и φ_2 – их начальные фазы. Амплитуда результирующего колебания, как известно, определяется по формуле

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (4.13)$$

откуда с учетом того, что интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, следует

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (4.14)$$

Последнее слагаемое в (4.13), (4.14) называется интерференционным членом и зависит от разности фаз складываемых колебаний. Для некогерентных волн эта разность непрерывно изменяется случайным образом, поэтому среднее по времени значение интерференционного члена будет равно нулю. Следовательно, для наблюдения интерференции света, необходимо, чтобы эта разность была для данной точки пространства постоянной.

Для получения когерентных световых волн применяют метод разделения волны, излученной одним источником, на две части, которые после прохождения разных оптических путей накладываются друг на друга, и наблюдается интерференционная картина. Оптической длиной пути называется произведение геометрической длины пути на показатель преломления среды, в которой распространялась волна. Разность оптических длин путей взаимодействующих когерентных волн называется оптической разностью хода

$$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 s_2 - n_1 s_1 . \quad (4.15)$$

Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме

$$\Delta = \pm m \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) , \quad (4.16)$$

то волны при сложении усилят друг друга (условие максимумов).

Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн в вакууме

$$\Delta = \pm \frac{2m+1}{2} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) , \quad (4.17)$$

то волны при сложении ослабят друг друга (условие минимумов).

Одним из первых ученых, кто наблюдал явление интерференции, был Т. Юнг, который в 1802 г. получил интерференционную картину в установке, показанной на рис. 4.6. Свет, предварительно прошедший через светофильтр, проходил через отверстие S в одном экране и падал на другой экран, в котором были проделаны две тонкие щели S_1 и S_2 . Эти щели являлись когерентными источниками света и давали достаточно четкую интерференционную картину на экране Э.

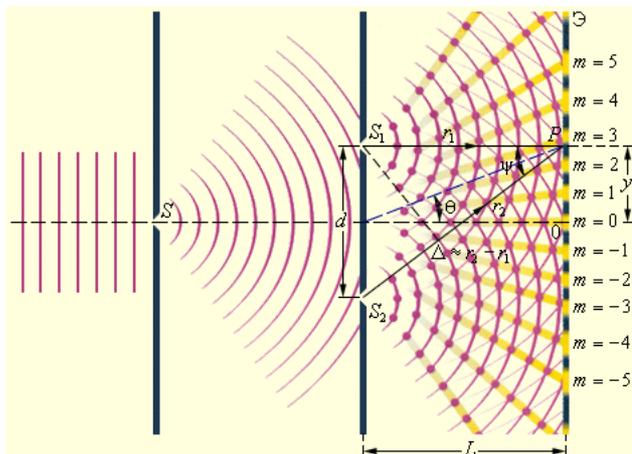


Рис. 4.6. Интерференционный опыт Юнга

В данной лабораторной работе для повышения степени когерентности взаимодействующих волн вместо обычного источника света со светофильтром используется лазерный источник излучения. Схема опыта представлена на рис. 4.7, где S_1 и S_2 – источники когерентного излучения, r_1 и r_2 – пути света от источников до точки наблюдения B , d – расстояние между щелями, L – расстояние между экранами.

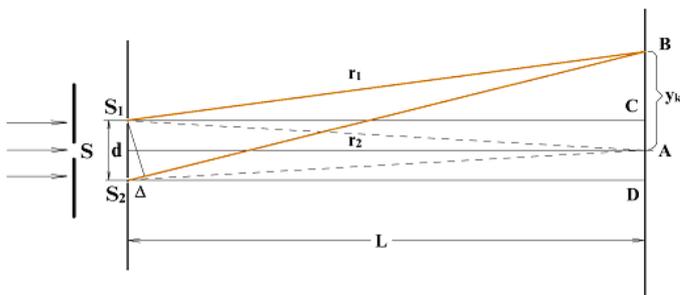


Рис. 4.7. Схема опыта

Из геометрии рис. 4.7 следует, что при выполнении условия $d \ll L$, оптическая разность хода волн составит для точки B

$$\Delta = \frac{y_k d}{L}. \quad (4.18)$$

Если в точке B наблюдается k -й максимум интенсивности света, то, объединяя (4.18) с условием максимумов, получаем

$$y_k = \pm \frac{kL\lambda}{d}. \quad (4.19)$$

Из (4.19) следует, что ширина интерференционной полосы на экране (расстояние между соседними максимумами интенсивности) равна

$$\Delta y = \frac{L\lambda}{d}, \quad (4.20)$$

а расстояние между щелями определяется по формуле

$$d = \frac{L\lambda}{\Delta y}. \quad (4.21)$$

Описание лабораторной установки

Источником света служит полупроводниковый (GaAs) лазер ($\lambda=650\text{nm}$). Параллельный световой пучок освещает фотолитографический тест-объект, который представляет собой тонкий стеклянный диск с непрозрачным покрытием, на котором по кругу параллельно радиусу нанесены пары щелей с разными расстояниями между ними. Пары щелей равной ширины объединены в группы по четыре. В пределах групп изменяются расстояния между щелями. Свет, интерферируя на паре щелей падает на экран, на котором и проводятся измерения ширины интерференционной полосы.

Порядок выполнения работы и обработки результатов

1. Добиться четкого изображения интерференционных полос.
2. Провести несколько (около 5) измерений ширины интерференционной полосы для каждой из пар щелей. Полученные данные усреднить. Данные занести в табл. 4.1, где $\Delta\tilde{y}$ – усредненное значение ширины интерференционной полосы.

Таблица 4.1

№ изм.	Номер пары щелей			
	1	2	3	4
1				
2				
$\Delta\tilde{y}$				

3. По результатам измерений, зная величину L (она равна сумме расстояний между экраном и зеркалом и зеркалом и фотолитографическим объектом) и длину волны излучения полупроводникового лазера, рассчитать расстояние между щелями по формуле (4.21).

4. Полученные результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№ пары щелей	1	2	3	4
D (мкм)				

5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение интерференции света.
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
3. Дайте определение когерентности. Что такое временная и пространственная когерентность?
4. Что такое геометрическая и оптическая длина пути и разность хода?
5. Сформулируйте условия минимумов и максимумов при интерференции.
6. Опишите методы получения когерентных световых волн.
7. Опишите схему опыта Юнга.
8. Выведите формулу линейных координат максимумов (минимумов) интенсивности света в опыте Юнга.

Лабораторная работа 4.4 ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА КЛИНА ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ ПОЛОС РАВНОЙ ТОЛЩИНЫ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 3, § 19 или [1], §§ 171–174). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение явления интерференции в воздушном зазоре между стеклянными пластинками, определение угла воздушного клина по интерференционной картине.

Теория метода и описание установки

Краткая теория и метод измерений.

Изучите основные положения теории интерференции по описанию лабораторной работы 4.3.

Рассмотрим нормальное падение монохроматической волны на поверхность воздушного клина, образованного почти параллельными стеклянными пластинками (рис. 4.8).

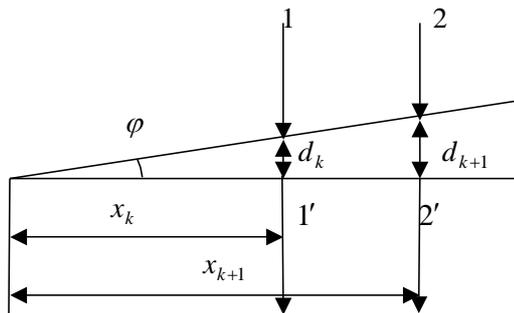


Рис. 4.8. Интерференция света в воздушном зазоре между двумя плоскопараллельными пластинками

С учетом того, что угол при вершине клина, как правило, очень мал, можно пренебречь отклонением лучей от первоначального направления в результате преломления на поверхностях клина. Лучи 1 и 2 преломляются на верхней поверхности клина и проходят в воздушный зазор. На нижней поверхности клина каждый из этих лучей делятся на два: один из них, преломившись, выходит в стекло, а другой отражается и движется в направлении верхней поверхности клина. На ней вновь происходит отражение, в результате чего появляется еще по одному лучу, которые преломляются на нижней поверхности клина и выходят в стекло. В результате мы получаем две волны, которые прошли различные оптические пути и, взаимодействуя друг с другом, создают интерференционную картину (наблюдение ведется в прошедшем свете).

Предположим, что лучи 1' создают на экране k -й, а лучи 2 – $(k+1)$ -й интерференционный максимум. Из предыдущих рассуждений можно сделать вывод, что оптическая разность хода лучей 1' составит

$$\Delta_k = 2d_k + \lambda, \tag{4.22}$$

а лучей 2'

$$\Delta_{k+1} = 2d_{k+1} + \lambda, \tag{4.23}$$

где дополнительная разность хода в одну длину волны объясняется двукратным отражением луча от оптически более плотной среды на границе воздух-стекло.

Из геометрии рис. 4.8 следует с учетом малости угла при вершине клина

$$x_k = \frac{d_k}{\varphi}, \quad x_{k+1} = \frac{d_{k+1}}{\varphi}. \quad (4.24)$$

Тогда можно найти расстояние между лучами 1' и 2' (расстояние между интерференционными максимумами на экране, если пренебречь расхождением этих лучей после прохождения клина)

$$\Delta l = x_{k+1} - x_k = \frac{d_{k+1} - d_k}{\varphi} = \frac{\Delta_{k+1} - \Delta_k}{2\varphi}. \quad (4.25)$$

Применяя условие максимумов при интерференции, из (4.25) находим

$$\varphi = \frac{\lambda}{2\Delta l}. \quad (4.26)$$

Описание лабораторной установки

Источником света служит полупроводниковый (GaAs) лазер ($\lambda=650\text{nm}$). Пучок света от лазера проходит через отверстие в экране и освещает рабочую поверхность интерференционного объекта, установленного на держателе в вертикальном юстировочном модуле. Интерференционный объект устроен таким образом, что между двумя плоскопараллельными пластинками имеется клиновидный воздушный зазор. Многократно отражаясь от пластин, лучи интерферируют, в результате чего на экране наблюдается цепочка светлых пятен. Измеряя ширину полос при помощи закрепленной на экране масштабной сетки, можно определить угол при вершине клиновидного воздушного зазора на экране. Чертеж лабораторной установки приведен на рис. 4.9.

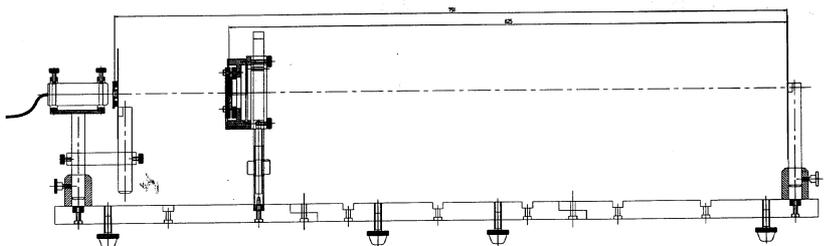


Рис. 4.9. Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы и обработки результатов

1. Включить полупроводниковый лазер. Вращением юстировочных винтов направить луч лазера по центру отверстия в экране.

2. Небольшим поворотом юстировочных винтов интерференционного объекта отрегулировать толщину зазора между его стеклянными пластинками (для получения клиновидного зазора необходимо ослаблять один или два винта). **Категорически запрещается затягивать винты, так как это может привести к повреждению пластинок.**

3. Измерить координаты не менее пяти максимумов освещенности на экране с точностью 1 мм и результаты записать в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Номер максимума	Линейные координаты максимумов x_k (мм)	Расстояние между максимумами Δl (мм)	Угол при вершине клина φ
1			
2			
3			
4			
5			

4. Вычислить расстояние между максимумами для каждой пары соседних максимумов освещенности.

5. Определить угол при вершине клиновидного воздушного зазора для каждого значения Δl и определить его среднее значение.

6. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение интерференции света.
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
3. Дайте определение когерентности. Что такое временная и пространственная когерентность?
4. Что такое геометрическая и оптическая длина пути и разность хода?
5. Сформулируйте условия минимумов и максимумов при интерференции.
6. Опишите методы получения когерентных световых волн.
7. Опишите явление возникновения полос равной толщины при интерференции света в тонких пленках и клиновидных зазорах.

8. Выведите формулу угла при вершине воздушного клина между почти параллельными стеклянными пластинками.

Лабораторная работа 4.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА. ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 3, § 28 или [1], § 190). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучение явления поляризации света, проверка закона Малюса.

Теория метода и описание установки

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряженностей электрического и магнитного полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости распространения волны (перпендикулярно лучу) (рис. 4.10). Для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора – вектора напряженности \vec{E} электрического поля, что обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны.

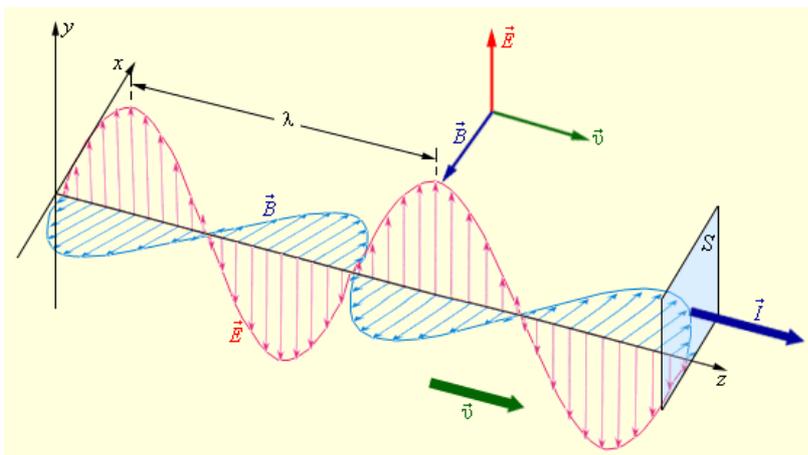


Рис. 4.10. Плоскополяризованная электромагнитная волна

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. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями светового вектора называется естественным.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется поляризованным. Так, если в результате каких-либо внешних воздействий появляется преимущественное направление колебаний светового вектора, то мы имеем дело с частично поляризованным светом. Свет, в котором вектор \vec{E} колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу, называется плоскополяризованным. Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора и направление распространения волны, называется плоскостью поляризации.

Плоскополяризованный свет является предельным случаем эллиптически поляризованного света, для которого вектор \vec{E} изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс в плоскости, перпендикулярной лучу (рис. 4.11). Если эллипс поляризации вырождается в прямую, то имеем дело с рассмотренным выше плоскополяризованным светом, если в окружность, то свет будет поляризован по кругу. Эллиптически поляризованную волну можно представить как результат сложения двух плоскополяризованных волн.

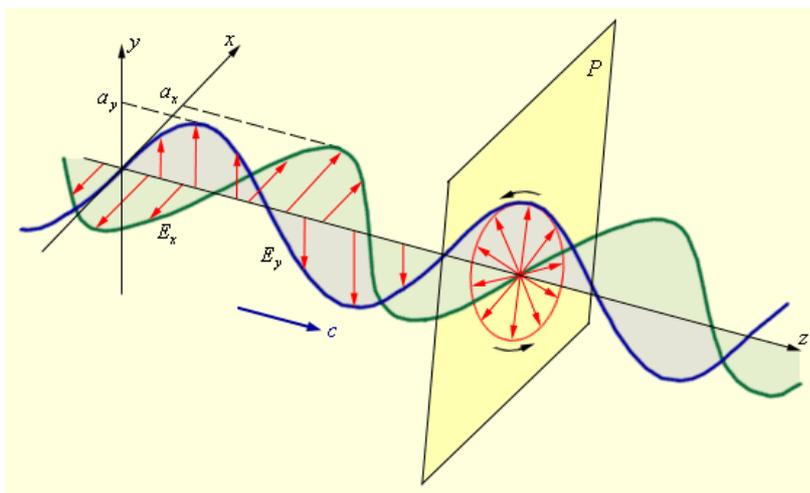


Рис. 4.11. Сложение двух взаимно перпендикулярных волн и образование эллиптически поляризованной волны

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые поляризаторы, пропускающие колебания только определенного направления (например, пропускающие колебания, параллельные главной плоскости поляризатора, и полностью задерживающие колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний светового вектора, например кристаллы. Из природных кристаллов, давно используемых в качестве поляризатора, следует отметить турмалин.

Степенью поляризации называется величина

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4.27)$$

где I_{\max} и I_{\min} – соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, прошедшего через поляризатор (поляризатор, служащий для анализа степени поляризации частично поляризованного света, называется анализатором).

Если на пути естественного света поставить поляризатор, то он пропустит только колебания, параллельные его главной плоскости, и интенсивность прошедшего (плоскополяризованного) света

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}. \quad (4.28)$$

Если вращать поляризатор относительно направления распространения плоскополяризованного луча, то интенсивность прошедшего света будет меняться в зависимости от угла между главной плоскостью поляризатора и плоскостью поляризации по закону Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (4.29)$$

Если естественный свет направить на систему из двух поляризаторов (поляризатор-анализатор, рис. 4.12), то интенсивность прошедшего через нее света будет определяться комбинацией формул (4.28), (4.29)

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi, \quad (4.30)$$

где в данном случае φ – угол между главными плоскостями поляризаторов.

Описание лабораторной установки

В конструкции лабораторной установки применена оптическая скамья стержневого типа. Источником света служит полупроводниковый (GaAs) лазер ($\lambda=650\text{nm}$). Между стержнями устанавливаются два поля-

ризатора в оправе. Свет прошедший через систему, попадает на фоточувствительную пластинку фотоприемника, к которому подключен мультиметр, находящийся в режиме измерения силы тока. В этом режиме показания мультиметра пропорциональны величине регистрируемого светового потока, что позволяет осуществить проверку закона Малюса.

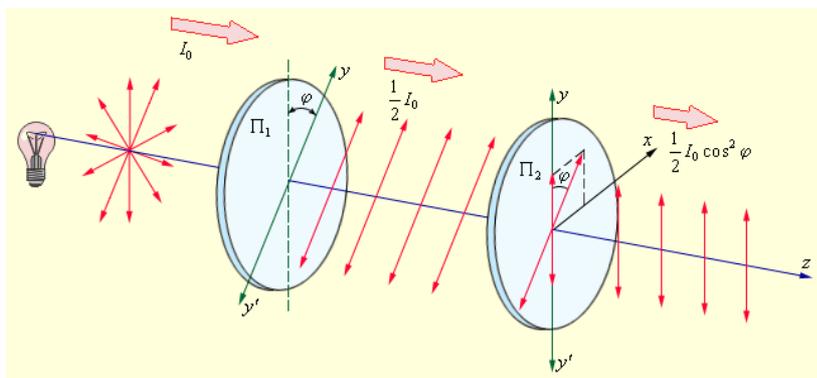


Рис. 4.12. Прохождение естественного света через два поляризатора

Порядок выполнения работы и обработки результатов

1. Включить полупроводниковый лазер. Совместить главные плоскости поляризаторов при помощи шкал, помещенных на их ободах. Дождаться установившегося значения на мультиметре и записать его показания в табл. 4.4.

2. Повернуть анализатор на угол 10^0 , дождаться установившегося значения на мультиметре и записать результат в табл. 4.4.

3. Повторить последовательность действий п. 2, вновь изменяя значение угла на 10^0 и записывая показания мультиметра в табл. 4.4.

4. Построить график зависимости $i = f(\cos^2 \varphi)$, где i – показания мультиметра.

5. Сделать выводы.

Таблица 4.4

№ измерения	φ (градусы)	i (мкА)
1	0	
37	360	

Контрольные вопросы

1. Дайте определение поляризованного и естественного света.
2. Какие волны называются продольными и какие – поперечными?
3. Охарактеризуйте различные виды поляризации.
4. Что такое поляризатор?
5. Дайте определение степени поляризации.
6. Сформулируйте закон Малюса.

Лабораторная работа 4.6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([2], т. 3, §§ 21–27 или [1], §§ 176–183). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: определение периода и числа штрихов на 1 мм длины отражательной дифракционной решетки.

Теория метода и описание установки

Дифракцией называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле – любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики. Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшие отверстия в экранах и т.д.

Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени. Принцип Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об амплитуде, а следовательно, и об интенсивности волн, распространяющихся по разным направлениям.

Френель вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции вторичных волн. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, световая волна, возбуждаемая каким-либо источником, может быть представлена как результат суперпозиции когерентных вторичных волн, излучаемых фиктивными источниками, которые, как правило, располагают на одной из волновых поверхностей.

Как правило, для решения задач дифракции приходится сталкиваться со значительными математическими трудностями. Однако, в некоторых наиболее простых случаях качественный вид дифракционной кар-

тины можно получить, пользуясь приемом, который получил название метод зон Френеля. В этом случае волновую поверхность разбивают на участки (зоны Френеля) таким образом, чтобы расстояния от краев соседних участков до точки наблюдения отличались бы друг от друга на половину длины волны. Поскольку колебания во всех точках волновой поверхности происходят синфазно, волны от соседних зон Френеля будут приходить в точку наблюдения в противофазе. При условии примерно одинаковых площадей зон, это приведет к тому, что результат воздействия всего волнового фронта в точке наблюдения будет определяться только числом и расположением открытых зон Френеля.

Принято различать два основных вида дифракции – дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера. Если источник света, препятствие и точка наблюдения расположены настолько далеко друг от друга, что лучи, приходящие от источника к препятствию и распространяющиеся от препятствия к точке наблюдения, то дифракция называется дифракцией в параллельных лучах или дифракцией Фраунгофера (плоский волновой фронт). В противном случае говорят о дифракции Френеля (сферический волновой фронт).

Большое практическое значение имеет дифракция, наблюдаемая при прохождении света через одномерную дифракционную решетку – систему параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками (существуют также и отражательные решетки, которые представляют собой множество близко расположенных, параллельных друг другу царапин, нанесенных специальной делительной машиной на поверхности отполированной до состояния зеркала металлической пластинки).

При исследовании дифракции на решетке используется, как правило плоскопараллельный световой пучок, который после прохождения через щели решетки собирается в фокальной плоскости установленной за решеткой линзы (рис. 4.13).

Обозначим ширину каждой щели через a , а ширину непрозрачного участка между щелями – через b . Величина

$$d = a + b \quad (4.31)$$

называется периодом (постоянной) дифракционной решетки.

Подсчет оптической разности хода волн, приходящих в определенную точку на экране от различных щелей решетки, и применение условий интерференционных минимумов (максимумов) показывает, что главные максимумы интенсивности света на экране будут наблюдаться в направлениях, определяемых условием

$$d \sin \theta = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (4.32)$$

где θ – угол дифракции (рис. 4.13), k – порядок (номер) максимума (спектра). В случае дифракции на N щелях между двумя главными мак-

симумами располагается $N-1$ минимум интенсивности, между которыми присутствуют вторичные максимумы, создающие весьма слабый фон. Условие главных минимумов интенсивности имеет вид

$$a \sin \theta = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots) . \quad (4.33)$$

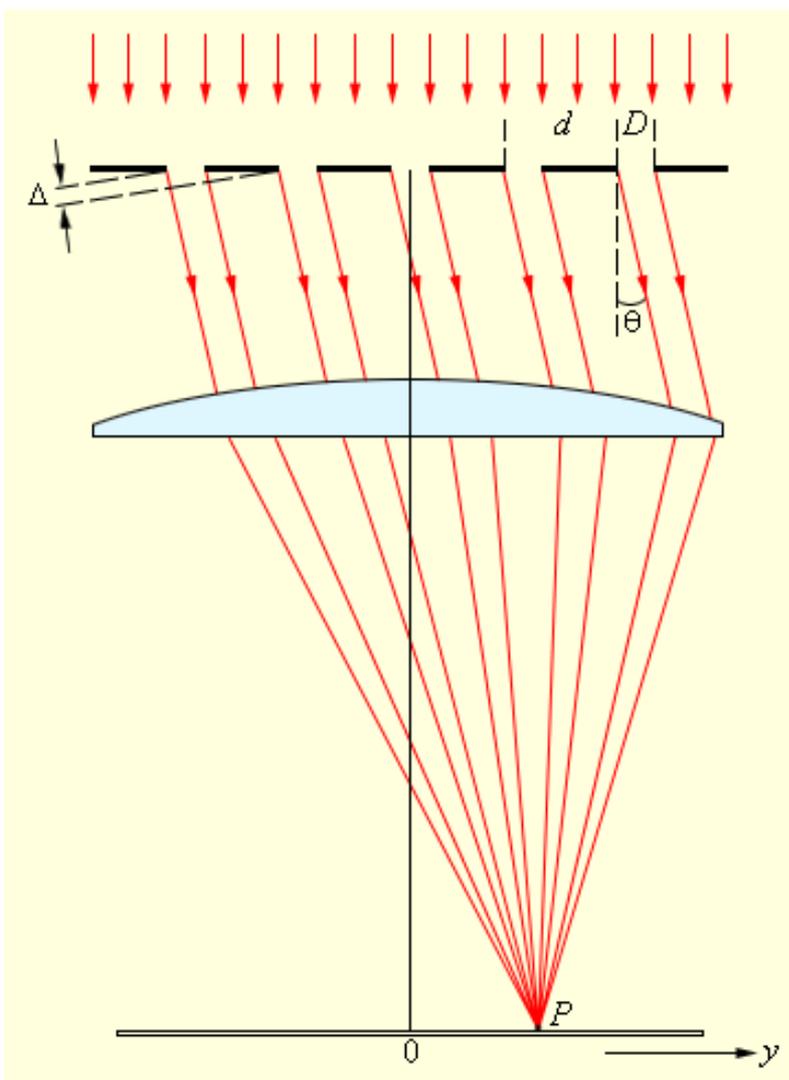


Рис. 4.13. Дифракция света на решетке

Пусть расстояние от решетки до экрана равно L , а линейная координата k -го максимума интенсивности света y_k . Используя приближение малых углов дифракции можно записать

$$\sin \theta_k \approx \operatorname{tg} \theta_k = \frac{y_k}{L}. \quad (4.34)$$

Тогда из формул (4.32), (4.34) следует

$$d = \frac{k\lambda L}{y_k}. \quad (4.35)$$

Дифракционные решетки используются в качестве спектральных приборов для анализа природы неизвестного излучения. Чтобы понять идею спектрального анализа, достаточно обратить внимание на то, что из формулы (4.35) можно выразить длину волны через период решетки и измеряемые на опыте величины. Поскольку период решетки известен (он определяется технологией производства на заводе-изготовителе), это позволяет определить длину волны излучения, что дает возможность установить источник данной линии в спектре.

Описание лабораторной установки

Источником света в лабораторной работе служит полупроводниковый (GaAs) лазер ($\lambda=650\text{нм}$). Его луч, пройдя через отверстие в непрозрачном экране, попадает на установленную на противоположном конце оптической скамьи отражательную дифракционную решетку. Дифракционная картина наблюдается на экране, к которому для удобства измерений прикреплена миллиметровая бумага.

Порядок выполнения работы

1. Включить полупроводниковый лазер. Перемещением крепления лазера (экрана) добиться того, чтобы луч проходил через отверстие в экране и попадал на решетку. Убедиться, что решетка и экран перпендикулярны лучу.
2. Измерить расстояние от решетки до экрана и записать результат в конспект.
3. Измерить линейные координаты пяти максимумов интенсивности света на экране и результаты записать в табл. 4.5.
4. Повторить измерения пункта 3 еще для двух решеток, имеющих другие периоды.
5. Вычислить для каждого измерения период решетки по формуле (4.35) и найти среднее значение периода для каждой из решеток.
6. Определить число щелей решетки на 1 мм длины по формуле

$$N = \frac{10^{-3}}{d}. \quad (4.36)$$

7. Сделать выводы.

Таблица 4.5

Номер решетки	L (мм)	Номер максимума	y_k (мм)	d (мкм)
1		1		
		...		
		5		
2		1		

Контрольные вопросы

1. Дайте определение дифракции.
2. Сформулируйте принципы Гюйгенса и Гюйгенса-Френеля.
3. Охарактеризуйте виды дифракции.
4. Изложите идею метода зон Френеля и приведите примеры его применения для полностью открытого волнового фронта, для дифракции Френеля на круглом диске и круглом отверстии.
5. Дайте определение дифракционной решетки и ее геометрических параметров.
6. Сформулируйте условие главных максимумов интенсивности света при дифракции на решетке.
7. Выведите расчетную формулу (4.35).

5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Лабораторная работа 5.1 ИЗУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1] §§ 197–201). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: исследовать зависимость теплового излучения (энергетической светимости или интегральной испускательной способности) абсолютно черного тела от температуры и проверить выполнение закона Стефана-Больцмана.

Теория метода и описание установки

Поместим два тела одинаковой температуры, обменивающиеся электромагнитным излучением, в зеркальную оболочку, полностью отражающую излучение. Обозначим через U_1 и U_2 энергии, испускаемые в 1 сек первым и вторым телом соответственно, а через a_1 и a_2 – коэффициенты поглощения этих тел, т.е. отношения энергии, которую они поглощают, к падающей на них энергии. Тогда поток энергии W_1 , уходящий от первого тела, складывается из энергии U_1 , которую оно излучает, и энергии $(1-a_1)W_2$, отраженной этим телом:

$$W_1 = U_1 + (1 - \alpha_1)W_2 \quad (5.1)$$

Энергия U_1 , испускаемая первым телом, равна поглощаемой им энергии:

$$U_1 = \alpha_1 W_2, \quad (5.2)$$

аналогично получаем (5.3):

$$U_2 = \alpha_2 W_1. \quad (5.3)$$

Вычитая W_2 из обеих частей (5.1), найдем (5.3а):

$$W_1 - W_2 = U_1 - \alpha_1 W_2, \quad (5.3a)$$

и, учитывая (5.2), получим (5.4):

$$W_1 = W_2 \quad (5.4)$$

Таким образом, при тепловом равновесии уходящая от тела электромагнитная энергия не зависит от того, что это за тело, и является, следовательно, функцией только температуры.

Из (5.2) и (5.3) следует (5.5):

$$\frac{U_1}{\alpha_1} = \frac{U_2}{\alpha_2} \quad (5.5)$$

т.е. для всех тел отношение испускательной и поглощательной способности не зависит от рода тела. В качестве второго тела возьмем тело, поглощающее все падающее на него излучение. Такие тела называются абсолютно черными, для них $\alpha_2 = 1$. Тогда излучение любого тела получается путем умножения излучения абсолютно черного тела U_{abc} на коэффициент поглощения данного тела α (закон Кирхгофа):

$$U = U_{abc} \alpha \quad (5.6)$$

Статистическое рассмотрение равновесного излучения позволяет получить основную формулу для равновесного распределения плотности энергии излучения по частоте, (либо по энергии фотонов $\rho(E) dE$) – формулу Планка:

$$\rho(\omega) d\omega = \frac{\eta}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\frac{\eta\omega}{kT}} - 1} \quad (5.7)$$

где $\rho(\omega)$ – плотность электромагнитной энергии, приходящейся на единичный спектральный интервал в единице объема.

Функция $\rho(\omega)$ схематически изображена на рис. 5.1.



Рис. 5.1. График функции $\rho(\omega)$

Формула Планка позволяет получить полную (проинтегрированную по частоте) плотность энергии равновесного излучения (5.8):

$$\rho = \int_0^{\infty} \rho(\omega) d\omega = \frac{\pi^2 k^4}{15 c^3 h^3} T^4 = \alpha T^4 \quad (5.8)$$

Представим модель абсолютно черного тела в виде небольшого отверстия, просверленного в полом теле. Если размер отверстия мал по сравнению с диаметром полости, то подавляющая часть входящего через

отверстия излучения «запутывается» в полости и не выходит обратно. Формула Планка позволяет получить выражение для полной энергии, излучаемой единицей поверхности абсолютно черного тела (испускательной способности):

$$U \sim r(T) = \sigma T^4, \quad (5.9)$$

где константа называется постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \frac{B_T}{M^2 K^4} \quad (5.10)$$

Таким образом, энергия излучения растет как четвертая степень температуры. При обычных условиях и температурах основные потери связаны с конвекцией и теплопроводностью. При достаточно высоких температурах основную роль начинают играть потери на излучение. В некоторых специальных условиях (сосуды Дьюара, колбы термосов) потери на излучение становятся существенными уже при нормальной температуре. Поэтому стенки таких сосудов делают зеркальными.

Приборы и оборудование

Установка состоит из следующих приборов: электропечи ЭП, приемника излучения (термостолбик ТС) и блока управления и индикации (БУИ) (рис. 5.2): Электропечь состоит из нагревательного устройства, термодары для измерения температуры, регулятора нагрева и вентилятора. Отверстие О в электропечи, служащее абсолютно черным телом, выведено на переднюю панель. На передней панели также размещены клавиши «Сеть» и «Вентилятор».

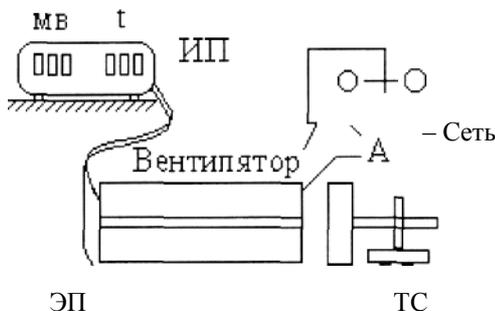


Рис. 5.2. Схема установки

На передней панели измерительного устройства размещены цифровые трехразрядные индикаторы напряжения термостолбика и темпера-

туры электропечи. Термостолбик представляет собой несколько последовательно соединенных термопар. Напряжение термостолбика пропорционально мощности падающего на его поверхность излучения, которая пропорциональна энергетической светимости отверстия:

$$U_{TC} \sim P_{\text{пад.изл}} \sim r(T) \quad (5.11)$$

Таким образом, сняв зависимость напряжения термостолбика от температуры электропечи, можно исследовать зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от температуры и проверить закон Стефана-Больцмана.

Порядок выполнения работы

1. Установить термостолбик на расстоянии 2–3 см (по указанию преподавателя) от отверстия печи так, чтобы оси диафрагмы термостолбика и отверстия электропечи совпали.

2. Включить кнопку «Сеть» на задней панели БУИ (при этом на нем должны высветиться цифровые индикаторы). Дать установке прогреться 3–5 мин.

3. Убедиться в том, что лампочка справа от кнопки «работа» на передней панели БУИ погашена, если нет, то погасить ее кнопкой «стоп».

4. Включить электропечь кнопкой «сеть» на ее передней панели.

5. Нажать кнопку «установка», при этом должна загореться лампочка справа от кнопки. Кнопками «температура +» и «–» установить 700°C, затем перейти к режиму измерения температуры повторным нажатием кнопки «установка».

6. Нажатием кнопки «работа» включить нагрев электропечи. По цифровым индикаторам измерительного устройства снять с интервалом 50°C зависимость напряжения термостолбика от температуры электропечи.

7. По достижению максимальной рабочей температуры 700°C выключить нагреватель нажатием кнопки «стоп» электропечи и нажать кнопку «вентилятор», при этом должна загореться лампочка справа от кнопки.

8. Данные по измерениям свести в таблицу:

U_{TC}, b	t , град С	T , град К	T^4, K^4

При вычислении T прибавить поправку равную $t_{КОМН}$, т.к. термопара измеряет разность температур излучателя и корпуса электропечи.

9. На основе таблицы построить прямую (5.12):

$$U_{\text{тс}}(T^4) \quad (5.12)$$

Оценить погрешность.

10. Рассчитать постоянную Стефана-Больцмана, учитывая коэффициент пропорциональности $a = 7 \times 10^4 \text{ А/м}^2$ между энергетической светимостью абсолютно черного тела и напряжением термостолбика:

$$r = aU_{\text{тс}} \quad (5.13)$$

11. Сравнить полученное значение постоянной Стефана-Больцмана с табличным (5.10).

12. Оценить выполнение закона Стефана-Больцмана. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит излучаемая телом электромагнитная энергия.
2. Какое тело называют абсолютно черным.
3. В чем состоит закон Кирхгофа для излучения.
4. Что определяет формула Планка.
5. Сформулировать закон Стефана-Больцмана.

Лабораторная работа 5.2 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1] §§ 202–204). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы: изучить законы внешнего фотоэффекта, определить постоянную Планка.

Теория метода и описание установки

Гипотеза Планка получила подтверждение при объяснении явления фотоэлектрического эффекта. Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Фотоэффект был обнаружен в 1887 году Г. Герцем, позднее детально исследован А.Г. Столетовым, схема опыта которого приведена на рис. 5.3.

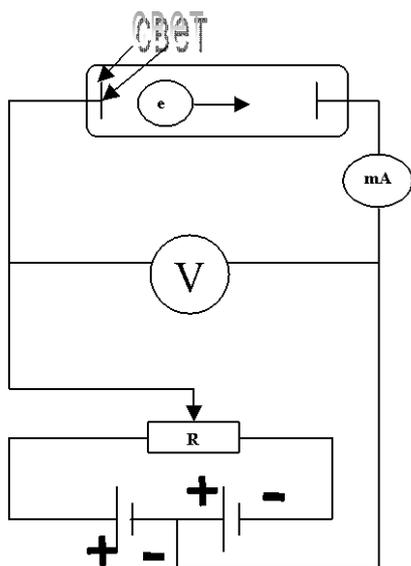


Рис. 5.3. Принципиальная схема для исследования фотоэффекта

В вакуумной трубке с помощью потенциометра R можно менять величину напряжения между катодом K и анодом A и его знак. Облучая катод светом разных длин волн, Столетов установил следующие основные закономерности фотоэффекта:

1. Сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.
2. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, то есть минимальная частота ν_0 , ниже которой фотоэффект не происходит.
3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света и линейно возрастает с частотой излучения.

В 1905 году для объяснения явления фотоэффекта А. Эйнштейн выдвинул квантовую теорию фотоэффекта, согласно которой свет испускается, распространяется в пространстве и поглощается в веществе порциями – квантами (фотонами), энергия которых

$$\varepsilon = h\nu \quad (5.14)$$

При этом каждый квант поглощается только одним электроном. Отсюда следует первый закон фотоэффекта. Энергия падающего фотона идет на совершение им работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии:

$$h\nu = A + mv_{\max}^2/2, \quad (5.15)$$

это уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, из которого непосредственно следует вывод второго и третьего законов фотоэффекта. Так, максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с ростом частоты падающего света (третий закон). А с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается до нуля, при этом

$$h\nu_0 = A, \quad (5.16)$$

следовательно,

$$\nu_0 = A/h \quad (5.16a)$$

красная граница фотоэффекта для данного материала. Эксперимент, представленный на рис. 5.3, позволяет получить вольт-амперную характеристику фотоэффекта – зависимость фототока i от разности потенциалов между катодом и анодом U (рис. 5.4)

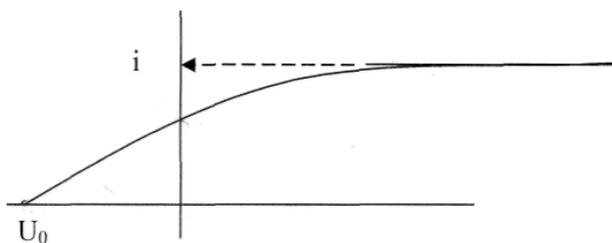


Рис. 5.4. Зависимость фототока от разности потенциалов между анодом и катодом

С ростом U фототок i постепенно возрастает, т.е. все большее число фотоэлектронов достигает анода, и достигает насыщения $i_{\text{нас}}$. При $U=0$ фототок не исчезает, то есть электроны, выбитые из катода, обладают некоторой начальной скоростью v , позволяющей им достигнуть анода без внешнего поля. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение U_0 , измерив которое, можно определить максимальное значение скорости и кинетической энергии фотоэлектронов:

$$mv_{\max}^2/2 = qU_0 \quad (5.17)$$

Приборы и оборудование

Основные блоки установки – блок облучения, содержащий лампу ДРС-50, блок, содержащий фотоэлемент и блок управления и индикации,

на передней панели которого размещены кнопка «прям-обр.» для выбора режима измерения прямой и обратной ветви ВАХ фотоэлемента, цифровой индикатор значений фототока (мкА) и напряжения (В) фотоэлемента. Интервал регулирования напряжений кнопками «+», «-», «сброс» от 0 до 10 В в прямом режиме и от 0 до 1 В – в обратном.

Порядок выполнения работы

1. Включить тумблер «Сеть» на задней панели блока управления и индикации. При этом должны загореться индикаторы 000.
2. Нажать «сброс». Установить режим измерения прямой ветви ВАХ.
3. Включить «Сеть» блока облучения.
4. С помощью кнопок «+» и «-» изменяем подаваемое на анод фотоэлемента напряжение, одновременно считывая значения фототока на блоке индикации.
5. Нажать «сброс». Установить режим измерения обратной ветви ВАХ.
6. Повторить п. 4.
7. Сменить светофильтры, повторить п. 2–6.
8. Отключить «Сеть» приборов.
9. Построить ВАХ.
10. Найти число фотоэлектронов, выбитых в единицу времени:

$$n = i_H / e, \quad (5.18)$$

где $e=1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

11. Для найденных задерживающих потенциалов U_1 и U_2 соответствующих двум длинам волн, оценить постоянную Планка по формуле:

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{c \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (5.19)$$

где $c=3 \times 10^8$ м/с.

12. Оценить погрешность.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта.
2. Что такое «красная граница» фотоэффекта.
3. Сформулировать законы фотоэффекта.
4. Вывод второго и третьего законов фотоэффекта на основе уравнения Эйнштейна.

5. Объяснить ход прямой и обратной ветвей графика зависимости фототока от напряжения между катодом и анодом.

Лабораторная работа 5.3 ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА

Ознакомьтесь с теорией в учебнике ([1], §§ 208–212). Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект.

Цель работы:

1. Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.

2. Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейного спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.

3. Экспериментальное определение постоянной Ридберга.

Теория метода и описание установки

Квантово-механический подход к изучению процессов поглощения света атомами позволяет их исследовать и объяснять. Состояние атома в квантовой механике описывается волновой функцией ϕ_n , его энергия E_n . В случае простейшего атома – атома водорода, состоящего из протона и электрона, квантовая механика позволяет получить точные решения волнового уравнения Шредингера (5.20)

$$\Delta\phi + \frac{2m}{\eta^2} \left(E + \frac{q^2}{r} \right) \phi = 0, \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (5.20)$$

где m – масса электрона, e – его заряд, E – полная энергия. Его решение для атома водорода дает набор дискретных уровней энергии. Для связанных состояний ($E_n < 0$):

$$E_n = -\frac{mq^4}{2\eta^2} \frac{1}{n^2}, \quad (5.21)$$

где $\eta = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число.

С ростом n уровни энергии атома сближаются, в пределе ($n \rightarrow \infty$) дискретный спектр приближается к непрерывному, а квантовая система к классической. Это и есть принцип соответствия Бора, который позволяет выразить постоянную Ридберга через фундаментальные постоянные.

Для простоты Бор принял, что в атоме водорода электроны вращаются вокруг протона по окружности радиусом r с циклической частотой ω :

$$m\omega^2 r = \frac{mv^2}{r} = \frac{q^2}{r^2} \quad (5.23)$$

Согласно правилу квантования момента импульса электрона в атоме:

$$mvr = n\eta \quad (5.24)$$

Решение (5.23), (5.24) дает выражение для радиусов круговых орбит электронов в атоме водорода:

$$r_n = \frac{\eta^2}{mq^2} n^2, \quad (5.25)$$

а также выражение (5.21).

Таким образом, при переходе атома водорода из состояния n_2 с энергией E_2 в состояние n_1 с энергией E_1 действует правило частот Бора:

$$E_2 - E_1 = \eta\omega, \quad (5.26)$$

то есть испускается фотон с частотой ω и длиной волны

$$\omega = \frac{mq^4}{2\eta^3} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (5.27)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (5.28)$$

где $R = 1,1 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$ постоянная Ридберга.....

Формула (5.28) называется формулой Бальмера-Ритца. В этой формуле с увеличением n_2 разность между волновыми числами $\frac{1}{\lambda}$ уменьшается, стремясь при $n_2 \rightarrow \infty$ к определённому значению (для $n_1 = 2, \frac{1}{\lambda} = \frac{R}{4}$). При линии, сближаются, и уменьшается их интенсивность. Совокупность спектральных линий, закономерно меняющих свою интенсивность, называют спектральной серией. Предельное волновое число при $n_2 \rightarrow \infty$ называется границей серии. Визуально мы можем наблюдать только серию Бальмера: для водорода — $n_1 = 2, n_2 = 3, 4, 5 \dots$ (рис. 5.5)

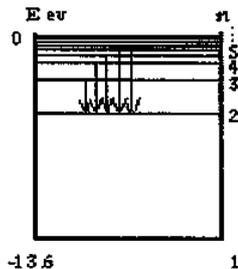


Рис. 5.5. Серия Бальмера для водорода

Приборы и оборудование

Схема установки приведена на рис. 5.6.

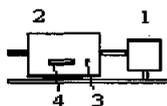


Рис. 5.6. Установка для изучения спектра водорода

Установка содержит излучатель 1 и монохроматор 2. Блок излучателя содержит лампу ТВС-15, заполненную водородом, устройство ее питания и юстировочный узел.

Внимание! Необходимо проверить заземление излучателя перед включением. В исходном состоянии излучатель отъюстирован. Вертикальная юстировка осуществляется перемещением держателя в рейтере. Горизонтальная позволяет перемещать центр области свечения лампы относительно оси излучателя по горизонтали от 0 до 3 мм для лучшего совмещения с выходным окном излучателя.

Монохроматор предназначен для выделения и исследования монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 2000 до 8000 ангстрем. Для наблюдения спектра на выходной патрубке надевается окуляр, положение которого регулируется наблюдателем. Сканирование спектра осуществляется вращением ручки 3 рядом с индикатором цифрового счетчика длин волн 4. Первые три цифры счетчика 4 соответствуют длине волны в нм, по барабану с рисками отсчитываются десятые доли нм в том же окне.

Порядок выполнения работы

1. Провести начальную юстировку системы на оптической скамье по схеме на рис. 5.6.
2. Установить щели и окуляр МУМ.

3. Ручкой МУМ установить какую либо линию спектра и до юстировать систему, используя юстировочную ручку излучателя.

4. Просканировать весь наблюдаемый спектр. Наблюдать спектральные линии можно визуально с помощью окуляра. Измерения провести два раза и усреднить.

5. Результаты измерений занести в таблицу

цвет линии	n_1	n_2	λ_1	λ_2	$\lambda_{\text{среднее}}$	$\lambda_{\text{теор}}$

Построить график зависимости $\frac{1}{\lambda}$ от $\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}$ и оценить постоянную R как тангенс угла наклона. Сравнить с $R_{\text{теор}}$.

Контрольные вопросы

1. Что дает квантово-механический подход к рассмотрению состояния атома водорода.
2. В чем состоит принцип соответствия Бора.
3. Что дает формула Бальмера-Ритца.
4. Объяснить схему уровней в спектре атома водорода.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. – 15-е изд., стереотип / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2007. – 560 с.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие в 3 т. / И.В. Савельев. – СПб.: Лань, 2005.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие для студ. вузов в 5 кн. / И.В. Савельев. – М.: АСТ: Астрель, 2006.

СОДЕРЖАНИЕ

1. МЕХАНИКА	1
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	21
3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	41
4. ОПТИКА.....	78
5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	103
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	115

Учебное издание

Составители

Доценко Валентин Антонович

Останин Борис Павлович

Родкина Людмила Романовна

Шавлюгин Александр Иванович

Шмакова Елена Эдуардовна

ФИЗИКА

Практикум

В авторской редакции

Компьютерная верстка М.А. Портновой

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 03816 от 22.01.2001

Подписано в печать .02.09. Формат 60×84/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. .

Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ

Издательство Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса

690600, Владивосток, ул. Гоголя, 41

Отпечатано в типографии ВГУЭС

690600, Владивосток, ул. Державина, 57