



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Физика»

Л. М. Курбатова, О. И. Проневич, П. А. Хило

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по курсу «Физика»

**для студентов всех специальностей
дневной формы обучения**

В трех частях

Часть 1

Гомель 2010

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73
К93

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 11.06.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Высшая математика» ГГТУ им. П. О. Сухого
В. И. Лашкевич

Курбатова, Л. М.

К93

Электричество и магнетизм : лаборатор. практикум по курсу «Физика» для студентов всех специальностей днев. формы обучения. В 3 ч. Ч. 1 / Л. М. Курбатова, О. И. Проневич, П. А. Хило. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 10 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Даны теоретические сведения по разделу «Электричество и магнетизм», методика измерений и порядок выполнения работ, справочный материал, необходимый для выполнения расчетов.
Для студентов всех специальностей дневной формы обучения.

**УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2010

Оглавление

Предисловие	4
Общие требования к отчету по лабораторным работам по разделу «Электричество и магнетизм»	5
Лабораторная работа № 2-2 «Определение диэлектрической проницаемости твердого полярного диэлектрика»	6
Лабораторная работа № 2-3 «Изучение электростатического поля методом электролитических моделей»	14
Лабораторная работа № 2-4 «Изучение законов постоянного тока»	23
Лабораторная работа № 2-5 «Исследование зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры»	32
Лабораторная работа № 2-6 «Изучение вольт – амперной характеристики полупроводникового диода»	40
Лабораторная работа № 2-7 «Изучение работы электронного осциллографа»	49
Лабораторная работа № 2-15 «Измерение емкости конденсатора с помощью гальванометра»	57
Литература	64

Предисловие

Предлагаемый лабораторный практикум предназначен для самостоятельной работы студентов дневной формы обучения всех специальностей.

Включает 7 лабораторных работ из разделов «Электростатика» и «Постоянный ток», а также работу по изучению осциллографа.

Ко всем лабораторным работам даны теоретические сведения, описание установок, методики работы с установками и порядок выполнения работ.

Цель данного лабораторного практикума: активизировать самостоятельную работу студентов и оказать помощь при выполнении лабораторных работ и их расчете.

Данный цикл лабораторных работ начинается с работы № 2-2. Лабораторная работа № 1 является вводной.

Общие требования к отчету по лабораторным работам и по порядку выполнения работ по разделу «Электричество и магнетизм»

При оформлении отчета необходимо соблюдать следующие правила:

1. Титульный лист должен быть оформлен согласно образца 1 (на стенде в лабораториях 503, 504).

2. В отчете указать цель работы, приборы и принадлежности с их характеристиками. Для электроизмерительных приборов указать систему прибора, класс точности, предел измерения.

3. Порядок выполнения работы должен содержать:

а) электрическую схему (если собирали две схемы, то обе надо начертить);

б) таблицы с данными опытов;

в) расчетные формулы;

г) расчет погрешности;

д) графики, выполненные на миллиметровой бумаге и от руки;

е) выводы с ответами на вопросы, указанные в конце каждой работы.

Перед выполнением лабораторной работы студент должен быть готов дать ответ по теоретическим вопросам касающихся выполненной работы и по методике выполнения работы.

Лабораторная работа № 2-2 Определение диэлектрической проницаемости твёрдого полярного диэлектрика.

Цель работы: изучить электрические свойства диэлектриков; измерить диэлектрическую проницаемость предлагаемых пластин.

Приборы и принадлежности: плоский составной конденсатор с набором пластин диэлектрика, генератор переменной ЭДС, частотомер, катушка взаимной индуктивности, масштабная линейка, соединительные провода и кабели.

1. Теоретическая часть

Дипольные моменты молекул диэлектрика.

Диэлектриками называются вещества, не способные проводить электрический ток. В диэлектриках в отличие от проводников нет свободных носителей заряда.

Все молекулы диэлектрика электрически нейтральны: суммарный заряд электронов и атомных ядер, входящих в состав молекулы, равен нулю. Тем не менее, молекулы обладают электрическими свойствами. Молекулу можно рассматривать как электрический диполь с электрическим моментом:

$$\vec{p} = |q| \cdot \vec{l},$$

где q - суммарный положительный заряд всех атомных ядер в молекуле;

\vec{l} - вектор, проведенный из «центра тяжести» электронов в молекуле в «центр тяжести» положительных зарядов атомных ядер (рис.2-1);

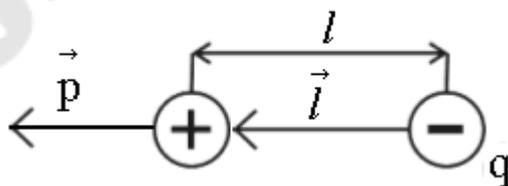


рис. 2-1

Полярные и неполярные диэлектрики.

Диэлектрик называется неполярным, если в отсутствии внешнего электрического поля «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов в молекулах этого диэлектрика совпадают ($\vec{l} = 0$) и

соответственно дипольные моменты молекул равны нулю ($\vec{p} = 0$) (рис. 2-2, а). Такие молекулы называются симметричными или неполярными к ним относятся O_2 , H_2 , N_2 , CCl_4 .

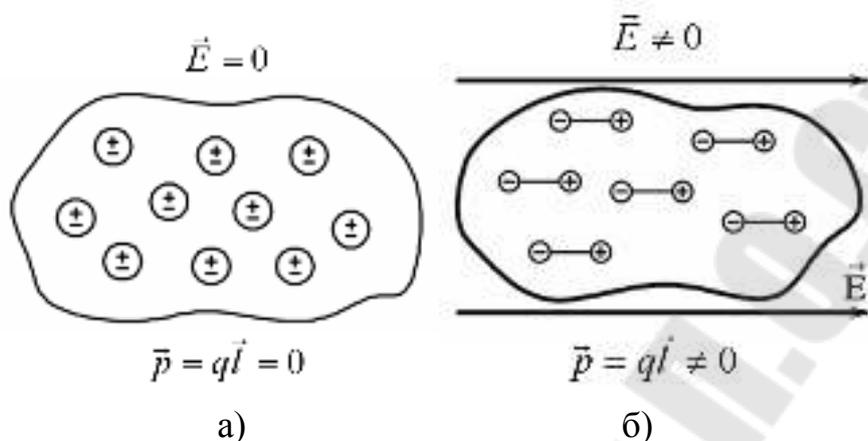


Рис. 2-2 Неполярная молекула:

- а) в отсутствие внешнего электрического поля,
 б) во внешнем электрическом поле.

Полярным диэлектриком называется такой диэлектрик, молекулы (атомы), которого имеют электроны, расположенные несимметрично относительно атомных ядер (H_2O , спирты, поливинилхлорид и др.) (рис. 2-3, а). В таких молекулах «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов не совпадают даже в отсутствие внешнего электрического поля и обладают дипольным моментом.

Однако дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их результирующий момент некоторого объема равен нулю (рис. 2-3, а).

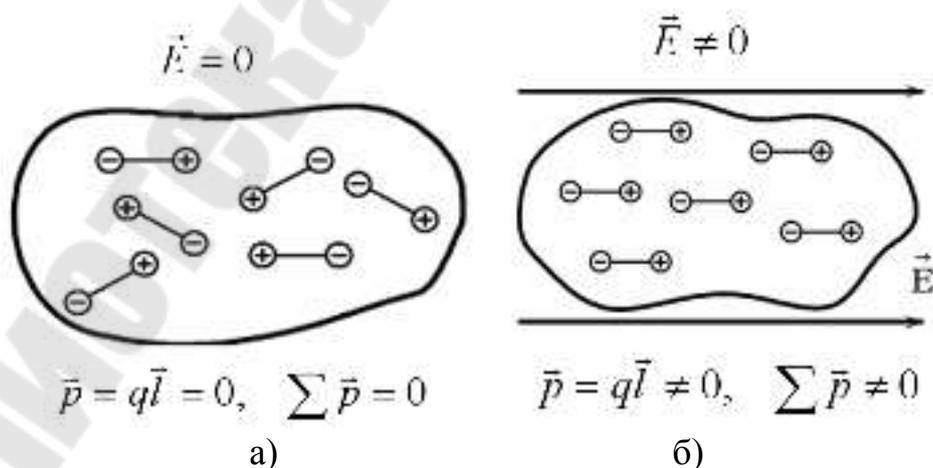


Рис. 2-3 Полярная молекула:

- а) в отсутствие внешнего электрического поля;
 б) во внешнем электрическом поле.

Поляризация диэлектриков.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика, состоящая в том, что в любом микроскопически малом его объеме ΔV возникает отличный от нуля суммарный дипольный электрический момент молекул.

В зависимости от строения молекул (атомов) диэлектрика различают три типа поляризации: электронную, ионную и ориентационную.

Электронная (деформационная) поляризация наблюдается у неполярных диэлектриков. Под действием внешнего электрического поля у молекул диэлектриков этого типа возникают индуцированные дипольные моменты, направленные по направлению вектора \vec{E} (рис. 2-2, б).

Ионная поляризация происходит в твердых диэлектриках, имеющих ионную кристаллическую решетку. Внешнее электрическое поле вызывает в таких диэлектриках смещение всех положительных ионов в направлении напряженности \vec{E} поля, а всех отрицательных ионов – в противоположную сторону.

Ориентационная поляризация наблюдается у полярных диэлектриков. Внешнее электрическое поле стремится ориентировать дипольные моменты полярных молекул (жестких диполей) по направлению вектора напряженности поля (рис. 2-3, б).

Так как внешнее поле деформирует электронные оболочки всех без исключения атомов и молекул диэлектрика, то деформационная поляризация имеет место во всех диэлектриках.

Количественной мерой поляризации диэлектрика служит вектор \vec{P} , называемый поляризованностью (вектором поляризации) и равный отношению суммарного электрического дипольного момента малого объема диэлектрика к величине этого объема.

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_i}{\Delta V},$$

где \vec{p}_i - электрический дипольный момент i -ой молекулы;

n - общее число молекул в объеме ΔV .

Для большего класса диэлектриков, поляризованность диэлектрика линейно зависит от напряженности поля \vec{E} :

$$\vec{P} = x \varepsilon_0 \vec{E}, \quad x = \varepsilon - 1,$$

где x – безразмерная величина, называемая диэлектрической восприимчивостью ($x > 0$);

ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Диэлектрическая проницаемость среды показывает отношение силы взаимодействия между двумя зарядами в вакууме $\vec{F}_0 = q\vec{E}_0$, к силе взаимодействия тех же зарядов в среде $\vec{F} = q\vec{E}$.

$$\varepsilon = \frac{\vec{F}_0}{\vec{F}} = \frac{q\vec{E}_0}{q\vec{E}} = \frac{\vec{E}_0}{\vec{E}} \text{ или диэлектрическая проницаемость среды}$$

показывает во сколько раз электрическое поле зарядов в вакууме сильнее электрического поля тех же зарядов в диэлектрике.

При помещении диэлектрика во внешнем электростатическом поле он поляризуется, т.е. приобретает отличный от нуля дипольный момент; происходит смещение зарядов: положительные, смещаются относительно положения равновесия, по полю, отрицательные – против поля (рис. 2-4).

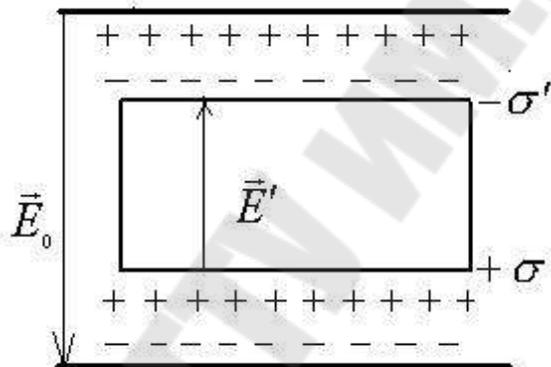


рис. 2-4

В результате этого на верхней грани диэлектрика, обращенного к положительно заряженной плоскости, будет избыток отрицательных зарядов, а на нижней грани диэлектрика, обращенной к отрицательно заряженной плоскости – избыток положительных зарядов. Заряды, появляющиеся в результате поляризации диэлектрика, называются связанными зарядами.

Появление связанных зарядов приводит к возникновению дополнительного электрического поля с напряженностью \vec{E}' , которое направлено против внешнего поля \vec{E}_0 (рис. 2-4) и ослабляет его. напряженность электрического поля, согласно формулы $\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon}$, зависит от свойств среды: нормальная составляющая напряженности поля при переходе из вакуума в среду всегда уменьшается во столько раз, во сколько возрастает диэлектрическая проницаемость. На границе

двух диэлектриков вектор напряженности претерпевает скачкообразное изменение, создавая тем самым неудобства при расчете электростатических полей. Поэтому помимо вектора напряженности вводится вектор электрического смещения, который для электрически изотропной среды равен: $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$ или $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$.

Вектор электрического смещения \vec{D} характеризует электрическое поле, создаваемое свободными зарядами, но при таком их распределении в пространстве, какое имеется при наличии диэлектрика.

Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике: поток вектора электрического смещения электрического поля сквозь произвольную замкнутую поверхность, равен алгебраической сумме свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_{i \text{ свобод.}}$$

2. Методика проведения измерений.

Для сравнения емкостей конденсаторов их поочередно включают в колебательный контур ($L_2 C_{\text{изм.}}$), индуктивно связанный с генератором переменной ЭДС (ЗГ) через катушку L_1 :

Если частота ЭДС генератора совпадет с частотой собственных колебаний контура $L_2 C_{\text{изм.}}$, то в контуре активным сопротивлением которого можно пренебречь, резонансно возрастет амплитуда переменного тока и соответственно возрастет напряжение на входе «У» осциллографа. Осциллограф необходим потому, что только его показания не зависят от частоты переменного тока. Таким образом, частоту резонанса можно определить по частотомеру, наблюдая за амплитудой отклонения электронного луча на экране осциллографа.

Условие резонанса:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_2 C}}$$

Так как изготовить вакуумный (или даже воздушный) конденсатор с заданным зазором и без применения диэлектриков невозможно, то и в настоящей работе используются конденсаторы (со сплошными и рамочными диэлектрическими пластинами). Конденсатор с рамочными пластинами можно рассматривать как параллельное соединение двух воздушного с площадью пластин S_1 и заполненного диэлектриком с площадью S_2 . Емкость такого конденсатора определяется формулой:

$$C_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_0 S_1}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_2}{d} = \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon S_2 + S_1)}{d}, \text{ а со сплошными } C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где S – площадь сплошных диэлектрических пластин.

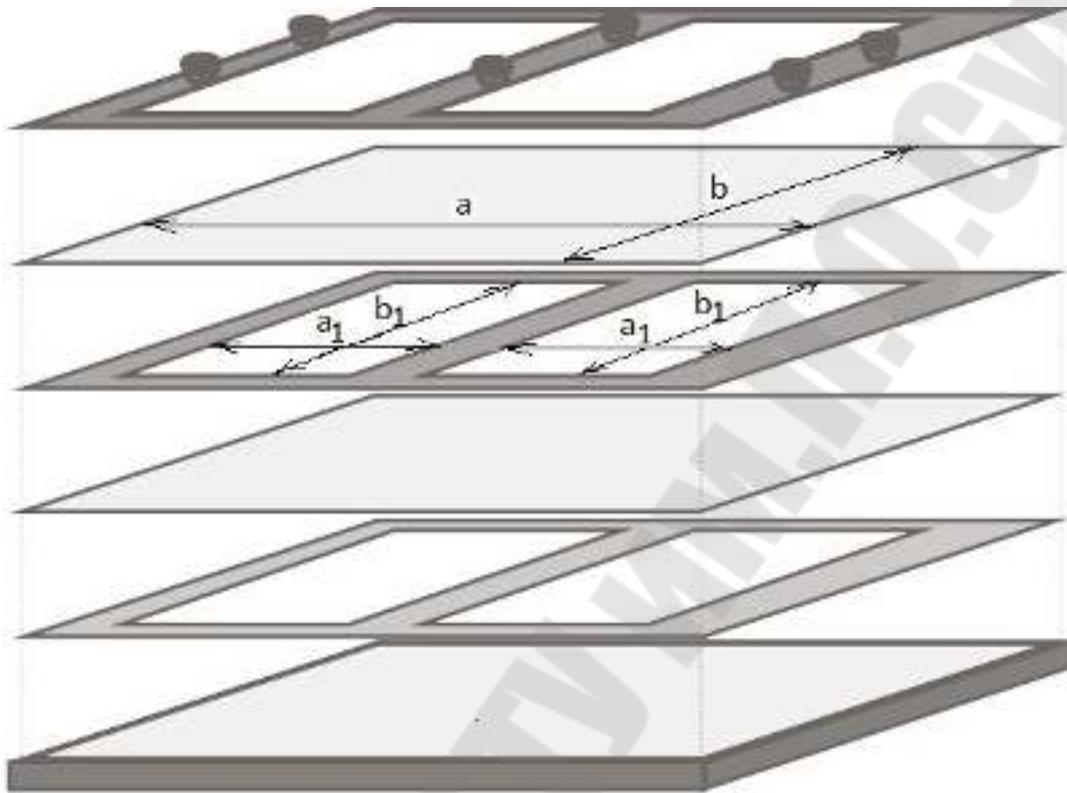


Рис. 2.5 Воздушный конденсатор.

3. Порядок выполнения работы.

1. Измерить размеры сплошных и рамочных диэлектрических пластин (не менее трех раз). Вычислить площадь двух сплошных пластин $S = 2ab$, площадь дырок $S_1 = 4a_1b_1$ (лаборатория 2-503) и $S_1 = 6a_1b_1 + 6a_2b_2$ (лаборатория 2-504), а также площадь рамок $S_2 = S - S_1$.

2. Собрать воздушный конденсатор (рис. 2-5), используя рамочные диэлектрические пластины.

3. Собрать электрическую схему (рис. 2-6). Включить в сеть 220В. Все приборы прогреть 5-10 минут.

4. Изменяя частоту звукового генератора определить частоту, при которой наблюдается максимальное отклонение электронного луча по вертикали на экране осциллографа. Частоту резонанса измерить частотомером или по шкале генератора. Записать частоту резонанса ($\nu_{\varepsilon} = \dots$ кГц). Настройку на резонанс и измерения сделать 3 раза.

5. Отключить все приборы от сети, разобрать конденсатор и заменить пластины сплошными пластинами. Включить приборы в сеть 220 В и повторить измерения согласно п. 4. Записать частоту резонанса ($\nu_{\partial} = \dots$ кГц).

6. Отключить один провод идущий от катушки взаимной индуктивности к конденсатору и повторить измерения согласно п. 4. записать частоту резонанса ($\nu_n = \dots$ кГц).

7. Вычислить среднее значение диэлектрической проницаемости (для всех величин взять среднее значение):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{S}_1 \bar{\nu}_e^2 (\bar{\nu}_n^2 - \bar{\nu}_{\partial}^2)}{\bar{S}_1 \bar{\nu}_{\partial}^2 (\bar{\nu}_n^2 - \bar{\nu}_e^2) - \bar{S}_2 \bar{\nu}_n^2 (\bar{\nu}_e^2 - \bar{\nu}_{\partial}^2)}$$

8. Определить абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений по формуле (приблизенно):

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon \left(\frac{\Delta S}{S} + 2 \frac{\Delta \nu_e}{\nu_e} + 2 \frac{\Delta \nu_{\partial}}{\nu_{\partial}} + 2 \frac{\Delta \nu_n}{\nu_n} \right), \text{ где}$$

$$\Delta \nu_e = \sqrt{\frac{\sum (\nu_{ei} - \bar{\nu}_e)^2}{n(n-1)} \cdot t^2(\alpha, n) + \frac{t(\alpha, \infty)}{3^2} \cdot \frac{C_{\min}^2}{2}},$$

$$\Delta \nu_{\partial} = \sqrt{\frac{\sum (\nu_{\partial i} - \bar{\nu}_{\partial})^2}{n(n-1)} \cdot t^2(\alpha, n) + \frac{t(\alpha, \infty)}{3^2} \cdot \frac{C_{\min}^2}{2}},$$

$$\Delta \nu_n = \sqrt{\frac{\sum (\nu_{ni} - \bar{\nu}_n)^2}{n(n-1)} \cdot t^2(\alpha, n) + \frac{t(\alpha, \infty)}{3^2} \cdot \frac{C_{\min}^2}{2}}$$

где C_{\min} - цена деления частотомера.

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial a} \right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial b} \right)^2 \Delta b^2},$$

$$\Delta a = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{n(n-1)} \cdot t^2(\alpha, n) + \frac{t(\alpha, \infty)}{3^2} \cdot \frac{C_{\min}^2}{2}}$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{\sum (b_i - \bar{b})^2}{n(n-1)} \cdot t^2(\alpha, n) + \frac{t(\alpha, \infty)}{3^2} \cdot \frac{C_{\min}^2}{2}}$$

где a, b - параметры сплошных прокладок

Относительная погрешность:

$$E = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100\%.$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу

9. Результат измерений представить в виде: $\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \Delta\varepsilon_i$

Таблица 2-1

N n/n	$\nu_B,$ кГц	$\nu_d,$ кГц	$\nu_{п},$ кГц	$\Delta \nu_B,$ кГц	$\Delta \nu_d,$ кГц	$\Delta \nu_{п},$ кГц	a, м	b, м	$S_2,$ м ²	a ₁ , м	b ₁ , м	$S_1,$ м ²	$S_2,$ м ²
1													
2													
3													
ср													

10. Сделать выводы.

В выводах дать ответы на следующие вопросы.

1) Что характеризует относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

2) Какое значение может принимать диэлектрическая проницаемость среды (сравнить с диэлектрической проницаемостью воздуха)

3) Какова связь между диэлектрической проницаемостью и диэлектрической восприимчивостью.

4) Какая величина является количественной мерой поляризации диэлектрика? Дайте определение этой величины и связана ли эта величина с диэлектрической проницаемостью среды.

5) Опишите результат проделанной работы.

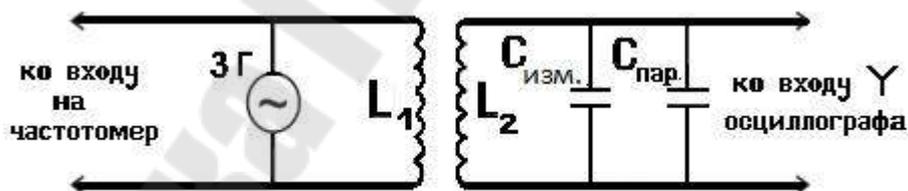


Рис. 2.6 Электрическая схема.

Лабораторная работа № 2-3

Изучение электростатического поля методом электролитических моделей.

Цель работы: изучить основные характеристики электростатического поля; построить качественную картину плоского электростатического поля для различной формы электродов и определить напряженность поля в заданной точке.

Приборы и принадлежности: источник постоянного тока, реостат, вольтметр, ванна с водой, гальванометр, металлический зонд, электроды различной формы.

1. Теоретическая часть

Всякое заряженное тело или электрический заряд создают вокруг себя силовое поле, которое называется электростатическим полем.

Количественной характеристикой силового действия поля является напряженность электростатического поля \vec{E} .

Напряженностью электрического поля называется векторная величина равная отношению силы, действующей со стороны поля на неподвижный пробный заряд, помещенной в рассматриваемую точку поля, к величине этого заряда

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

где q_0 – пробный электрический заряд, который должен быть столь малый, чтобы его внесение в поле не вызывало изменения значений и перераспределения в пространстве электрических зарядов, напряженность поля которых измеряется с его помощью.

Зная закон Кулона $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$ для точечных зарядов, можно

найти напряженность электростатического поля точечного заряда, если считать, что $q_1 = q$, $q_2 = q_0$, то

$$E_{m.z.} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}.$$

Графически электростатическое поле изображают с помощью линий напряженности (силовых линий), которые проводят так, чтобы касательные к ним в каждой точке пространства совпадали по направлению с вектором напряженности в данной точке поля (рис.3-1)

Если поле создается точечным зарядом, то линии напряженности – радиальные прямые, выходящие из заряда, если он положительный, и входящие в него, если заряд отрицательный

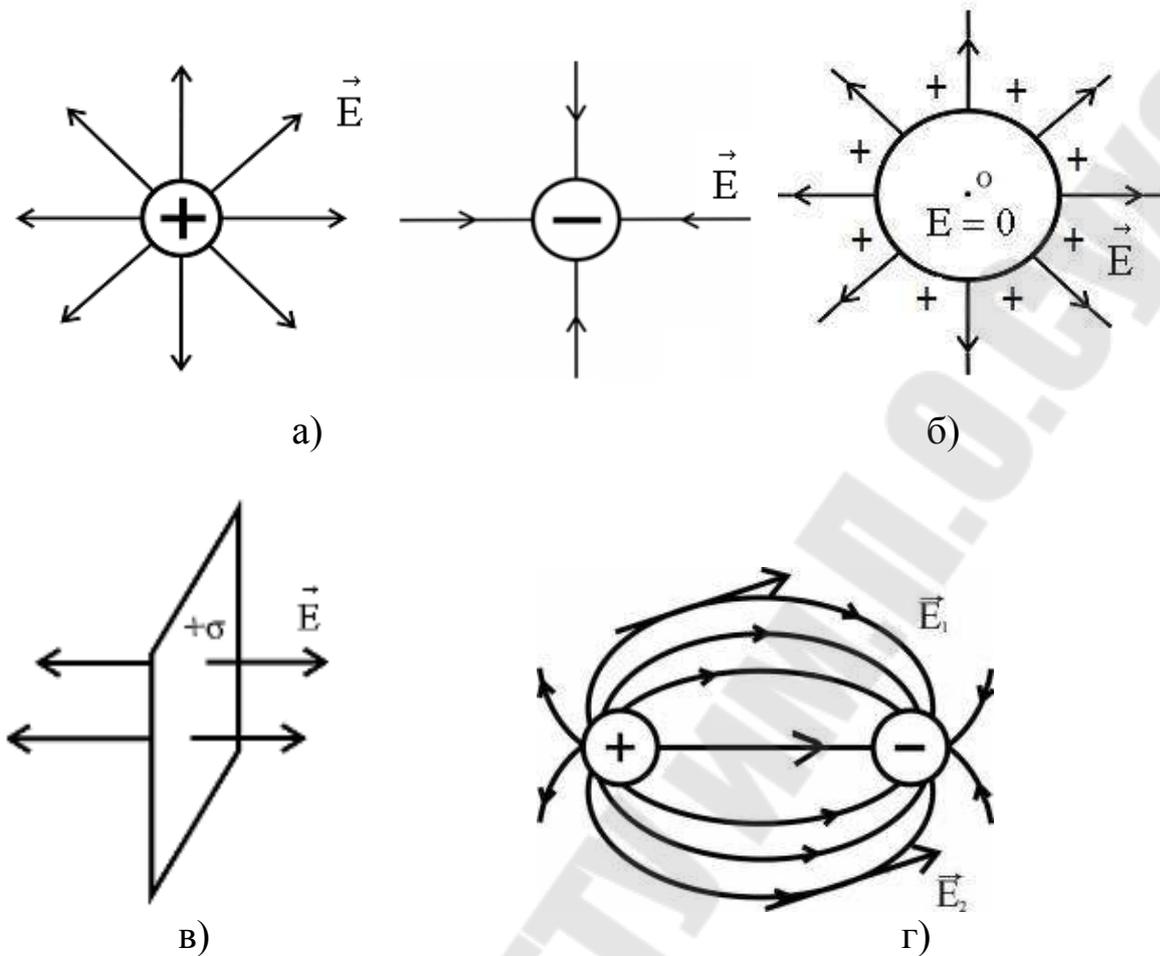


Рис. 3-1

- а) поле точечных зарядов;
- б) поле равномерно заряженной сферы;
- в) поле равномерно заряженной плоскости;
- г) поле системы 2х одинаковых по модулю и разноименных зарядов.

Если электростатическое поле создано не одним, а несколькими зарядами, q_1, q_2, \dots, q_n , то результирующая сила \vec{F} , действующая на пробный заряд q_0 в любой точке поля, равна геометрической сумме сил приложенных к заряду q_0 со стороны каждого из зарядов.

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Т.к. $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ и $\vec{F}_i = q_0 \vec{E}_i$,

где \vec{E} – результирующая напряженность поля системы зарядов, а \vec{E}_i – напряженность поля одного заряда q_i .

Тогда $q_0 \vec{E} = q_0 \sum \vec{E}_i$ или $\vec{E} = \sum \vec{E}_i$ - выражает принцип суперпозиции электрических полей.

Электростатическое поле является потенциальным, т.к. работа силы $\vec{F}_i = q_0 \vec{E}_i$ по любому замкнутому контуру равна нулю

$$\oint \vec{F}_i d\vec{r}_i = \oint q_0 \vec{E}_i d\vec{r} = 0.$$

А работа, совершаемая силами электростатического поля при малом перемещении $d\vec{r}$ точечного заряда q_0 в этом поле, равна убыли потенциальной энергии

$$dA = qEdr = -dW_n \text{ или}$$

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_2}, \text{ откуда следует, что потенциальная}$$

энергия точечного заряда q_0 в поле заряда q , равна

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r} + C,$$

где C – произвольная постоянная интегрирования.

Если считать, что при удалении заряда в бесконечность ($r \rightarrow \infty$) потенциальная энергия обращается в нуль, то $C = 0$ и потенциальная энергия пробного заряда находящегося на расстоянии r от заряда q ,

$$\text{равна } W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r}.$$

Физическая величина, равная отношению потенциальной энергии пробного электрического заряда, помещенного в рассматриваемую точку поля, к величине этого заряда называется потенциалом

$$\text{электростатического поля } \varphi = \frac{W}{q_0}.$$

Потенциал – энергетическая характеристика поля.

Потенциал поля, создаваемого точечным зарядом, равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$$

Если электростатическое поле создано системой из n точечных зарядов, то $\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$, т.е. при наложении электрических полей их потенциалы складываются алгебраически.

Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении пробного заряда из точки 1 в точку 2, равна

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2), \text{ если } \varphi_2 = 0, \text{ то } \varphi_1 = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

Следовательно, потенциал в какой-либо точке поля численно равен работе электростатических сил по перемещению пробного (единичного положительного) заряда из данной точки поля в бесконечность, где потенциал равен нулю.

Т.к. элементарная работа сил электростатического поля на малом перемещении dr равна $dA = qEdr$.

С другой стороны $dA = -qd\varphi$, тогда $E = -\frac{d\varphi}{dr}$ или в векторной форме $\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right)$ – связь между напряженностью и потенциалом, т.е. проекция вектора напряженности электростатического поля на произвольное направление численно равно быстрой убывания потенциала поля на единицу длины в этом направлении.

Геометрическое место точек электростатического поля, в которых значения потенциала одинаковы, называется эквипотенциальной поверхностью. Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении электрического заряда вдоль эквипотенциальной поверхности равна нулю.

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \text{ т.к. } \varphi_1 = \varphi_2$$

Для расчета электростатических полей используем принцип суперпозиции полей и теорему Гаусса.

Принцип суперпозиции полей – универсальный метод расчета любой системы неподвижных зарядов, а в случае если заряды не точечные, то их можно всегда свести к совокупности точечных зарядов, но этот метод связан с трудоемкими математическими операциями суммирования или интегрирования.

Метод, основанный на использовании теоремы Гаусса, удобен для расчета электростатических полей симметричных систем зарядов. Теорема Гаусса позволяет определить поток вектора напряженности электростатического поля через произвольную замкнутую поверхность.

Потоком вектора напряженности Φ_E электростатического поля сквозь произвольную замкнутую поверхность, называется величина

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E dS \cos(\vec{E} \wedge \vec{n}) = \oint_S E_n dS,$$

\vec{n} – вектор внешней нормали, т.е. нормаль, направленная наружу области, охватываемой поверхностью.

Найдем поток вектора напряженности сквозь сферическую поверхность радиуса r , охватывающую точечный заряд q , находящийся в ее центре (рис. 3-2) $\Phi_E = \oint_S E_n dS = E_n S = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$.

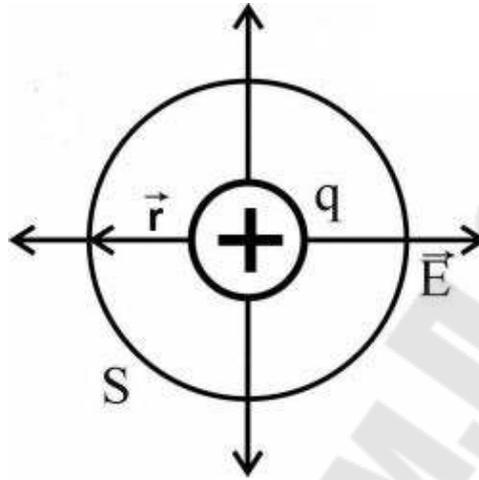


Рис. 3-2

Если поверхность произвольной формы охватывает n зарядов, то поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на электрическую постоянную ϵ_0 .

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \text{ — теорема Гаусса.}$$

Применим теорему Гаусса к расчету поля заряда q , равномерно распределенного по поверхности сферы радиуса R с поверхностной плотностью σ

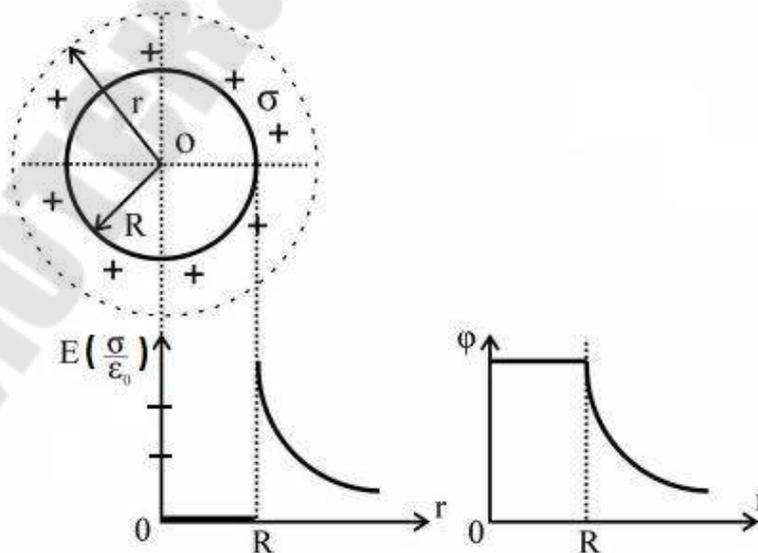


Рис. 3-3

В качестве гауссовой поверхности S возьмем сферу радиуса r с центром в точке O . (рис. 3-3.) Тогда $\oint_S E_n dS = E_n \int_0^{4\pi} dS = E4\pi r^2$.

$$\text{Если } r \geq R \text{ то } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r^2}, \text{ т.к. } \sigma = \frac{dq}{dS}.$$

Если $r < R$, $q_{\text{вн}} = 0$, $E = 0$ т.е. внутри заряженной сферы поля нет.

Потенциал поля φ найдем из формулы связи между потенциалом и напряженностью поля $E = -\frac{d\varphi}{dr}$. Пологая $\lim_{r \rightarrow \infty} \varphi = 0$, то потенциал поля вне сферы равен $\varphi = -\int_{\infty}^r E dr = -\int_{\infty}^r \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$.

Внутри заряженной сферы поля нет, так что потенциал всюду одинаков и такой же, как на ее поверхности $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0}$.

2. Метод электролитического моделирования

Точное измерение потенциала точек электростатического поля представляет собой трудную экспериментальную задачу. Поэтому свойства электростатического поля между заряженными проводниками выясняют, изучая другое поле – поле тока в проводящей среде теми же проводниками. Электрический ток характеризуется вектором плотности тока \vec{j} , который численно равен заряду, перенесенному в единицу времени через единичную площадку, расположенную нормально к направлению движения зарядов. Направлен вектор плотности тока в сторону движения положительных зарядов. Т.е. направление вектора плотности тока и вектора напряженности электрического поля совпадают. Связь между этими векторами: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ - это закон Ома в дифференциальной форме, где \vec{j} - вектор плотности тока, а σ - удельная электропроводность.

Метод изучения электростатического поля созданием эквивалентного ему поля тока называется моделированием электростатического поля

Так как в качестве проводящей среды для создания поля токов обычно используется электролит, то этот метод носит название электролитического моделирования.

В данной работе можно изучать поле между электродами различной конфигурации. Electrodes погружаются в стеклянную ванну, наполненную водопроводной водой, которая является слабопроводящим электролитом. Слабая проводимость среды, в которой создается поле, необходима потому, что при хорошей проводимости большие токи разогревают среду, а это приводит к искажению поля. Electrodes подключают к крайним точкам потенциометра “АС”, который питается от источника питания (Рис. 3-4). Разность потенциалов измеряется вольтметром “V”, внутреннее сопротивление которого должно быть больше сопротивления потенциометра и участка электролита между электродами. Ток в цепи “зонд-движок”

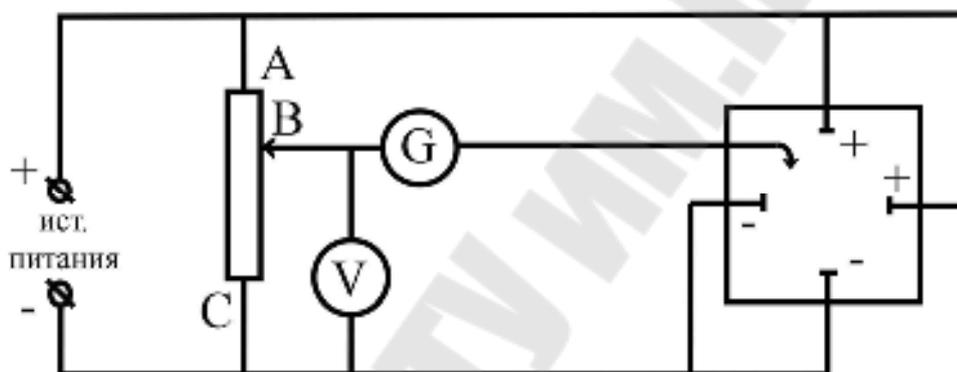


Рис.3-4.

регистрируется чувствительным гальванометром (микроамперметром). Координаты точек эквипотенциальных поверхностей определяют по координатной сетке, нанесенной на дно ванны. На характер поля в ванной существенно влияет неоднородность среды в ней. Чтобы уменьшить искажение поля, нужно брать ванну больших размеров.

Если условно принять потенциал точки “А” постоянным и численно равным нулю, то потенциал точки “С” следует считать также постоянным и численно равным разности потенциалов между точками “А” и ”С” (соответственно между электродами) Для любого положения скользящего контакта потенциометра можно найти такую точку в электролите, которая будет иметь потенциал, равный потенциалу выбранной точки потенциометра. При выполнении этого условия отсутствует ток в гальванометре. Перемещая зонд вверх – вниз и влево – вправо по дну ванны можно найти множество точек с одинаковым потенциалом, совокупность которых образует эквипотенциальную поверхность.

3. Порядок выполнения работы.

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 3-4).
2. Получить указания у преподавателя: а) какой формы электроды следует использовать в работе; б) как расположить электроды в ванне. Включить источник питания.
3. Поставьте движок потенциометра в положение соответствующее первому значению потенциала φ_1 (задается преподавателем).
4. Перемещая зонд в ванне определить координаты точек равного потенциала, при которых ток через гальванометр отсутствует (точек не менее 20-25).
5. Действия, аналогичные указанным в пунктах 3 и 4 производят также еще для двух значений потенциала φ_2 и φ_3 .

Все значения заносят в таблицу 3-1

Таблица 3-1

Номер точки	1		2		3		4		5		6		...	
Ее координаты	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	x_5	y_5	x_6	y_6	x_n	y_n
$\varphi_1 = \dots B$														
$\varphi_2 = \dots B$														
$\varphi_3 = \dots B$														

6. Обработка результатов измерений включает построение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий:

а) на миллиметровую бумагу в масштабе 1:1 или 1:2 наносят границы электролитической ванны и обозначают положения электродов и их знаки;

б) на миллиметровое поле наносят полученные при выполнении опыта точки;

Проводят по точкам эквипотенциальные поверхности и линии напряженности. Линии напряженности на положительных электродах (+) начинаются и заканчиваются на отрицательных электродах (-) Линии напряженности пересекают эквипотенциальные поверхности под прямым углом (90°).

в) в разных точках поля между электродами определить значения напряженности E по формуле $E = \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} \right|$, где Δy - расстояние измеренное по кратчайшей прямой с учетом масштаба между теми эквипотенциальными поверхностями, между которыми берется разность потенциалов.

7. Сделать выводы.

В выводах дать ответы на следующие вопросы:

- 1) В чем сущность метода моделирования электростатического поля?
- 2) Можно ли вычислить напряженность в данной точке поля по известной картине эквипотенциальных поверхностей? Что дополнительно необходимо знать для этого расчета?
- 3) Как изменяется потенциал поля φ от расстояния в заданном направлении?
- 4) Выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 2-4 Изучение законов постоянного тока.

Цель работы: изучить законы постоянного тока; опытным путем установить зависимость полной и полезной мощностей и к.п.д. источника тока от нагрузки;

научиться применить законы Ома и Кирхгофа для расчета электрических цепей.

Приборы и принадлежности: два источника питания, два ключа, два миллиамперметра на 100 мА, вольтметр на 15 В, набор сопротивлений.

1. Теоретическая часть

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. Для возникновения и существования электрического тока в среде необходимо наличие двух условий:

- в среде должны быть носители тока (у металлов электроны проводимости);
- должно существовать электрическое поле.

За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов. Если в действительности движутся не положительные, а отрицательные заряды, то направление электрического тока считается противоположным направлению движения отрицательных зарядов.

Количественной мерой интенсивности движения электрических зарядов является сила тока I – скалярная величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени: $I = \frac{dq}{dt}$.

Для постоянного тока величина и направление, которого не изменяется с течением времени $I = \frac{q}{t}$.

Для характеристики направления электрического тока вводится вектор плотности тока \vec{j} . Плотность тока – вектор, ориентированный по направлению тока, определяемый силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока $j = \frac{I}{S} = \frac{q}{S \cdot t}$.

Если концентрация носителей тока равна n , каждый носитель имеет заряд e и движется со скоростью упорядоченного движения \mathcal{G} , то за время dt через поперечное сечение S перенесется заряд $dq = ne\mathcal{G}Sdt$,

а плотность тока $\vec{j} = ne\vec{\mathcal{G}}$

С другой стороны сила тока – это поток вектора плотности тока сквозь произвольную поверхность S

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}.$$

Итак, для существования электрического тока нужно наличие свободных зарядов и наличие электрического поля. Если в проводнике создать электрическое поле и не принять мер для его поддержания, то ток в проводнике быстро исчезнет. Чтобы поддерживать ток в проводнике достаточно долго, нужно от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить приносимые сюда заряды, а к концу с большим потенциалом непрерывно подводить заряды (рис. 4-1).

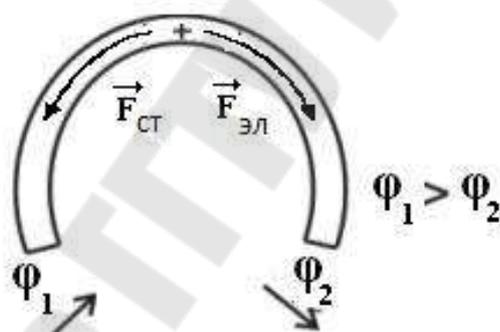


Рис.4-1

Перемещение этих зарядов осуществляется за счет сил неэлектрического происхождения, т.е. сторонних сил. Природа сторонних сил может быть различна. Эти силы могут возникать за счет энергии химических реакций; за счет энергии магнитного поля; за счет механической энергии. Сторонние силы, перемещая электрические заряды, совершают работу. Физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (э.д.с.) ε

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q_0}.$$

Работа сторонних сил над пробным зарядом (единичным положительным) в замкнутой цепи равна:

$$A_{cm} = \oint F_{cm} dl = q_0 \oint E_{cm} dl, \text{ тогда э.д.с. } \varepsilon = \frac{A_{cm}}{q_0} = \oint E_{cm} dl.$$

Кроме сторонних сил, на единичный положительный заряд действуют силы электростатического поля. Тогда результирующая сила действующая на заряд q_0 будет: $\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{cm}$.

Работа результирующей силы над зарядом q_0 на участке 1-2 будет:

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 E_{эл} dl + q_0 \int_1^2 E_{cm} dl = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) + q_0 \varepsilon_{12}.$$

Физическая величина численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда на участке 1-2, называется напряжением $U_{12} = \frac{A_{эл} + A_{cm}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$.

Участок цепи, не содержащий э.д.с., называется однородным. Участок цепи, содержащий источник э.д.с., называется неоднородным.

Немецкий физик Г. Ом экспериментально установил, что сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику пропорциональна напряжению на концах проводника $I = \frac{U}{R}$,

где R – сопротивление проводника;

$$\frac{1}{R} = G \text{ – проводимость проводника;}$$

$I = \frac{U}{R}$ - закон Ома для участка цепи, не содержащего источника тока (э.д.с.).

Если учесть, что $I = jds$; $U = Edl$ и $R = \rho \frac{dl}{dS}$, то закон Ома

можно представить в дифференциальной форме: $j dS = \frac{Edl}{\rho dl} dS$,

$j = \frac{E}{\rho} = \sigma E$, где ρ - удельное сопротивление проводника; $\sigma = \frac{1}{\rho}$ -

удельная проводимость.

Так как плотность тока \vec{j} и напряженность электрического поля \vec{E} - величины векторные и направление их совпадают, то закон Ома в дифференциальной форме (векторной) можно записать так:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

Для участка неоднородной цепи закон Ома в дифференциальной форме будет:

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{см}) \text{ или в интегральной форме } IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12};$$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R_{общ}}.$$

Если цепь замкнута, т.е. $\varphi_1 = \varphi_2$, то получим закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{общ}} = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока (э.д.с.).

Так как электрический ток – это упорядоченное перемещение заряда под действием электрического поля, то работа тока:

$$A = qU = IUt, \text{ используя закон Ома } I = \frac{U}{R};$$

$$A = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t.$$

Мощность тока $P_{полез} = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ – это полезная мощность, т.е. мощность, которая выделяется во внешней цепи.

Полная мощность $P = I\varepsilon = I^2(R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$ – это мощность частично выделяется во внешней цепи (полезная), частично – на внутреннем сопротивлении (потеря мощности) коэффициент полезного действия источника равен:

$$\eta = \frac{P_{полез}}{P} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r} < 1.$$

Важные свойства электрических цепей:

1. Полезная мощность максимальна при выполнении “условия согласования” $R = r$, $(P_{полез})_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$;

2. Полная мощность максимальна при $R = 0$, уменьшается вдвое при $R = r$, стремится к нулю при $R \rightarrow \infty$

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{r};$$

3. КПД равен нулю при $R = 0$

$$\eta = 0.5 \text{ при } R = r$$

$$\eta \rightarrow 1 \text{ при } R \rightarrow \infty.$$

Графики зависимости $I(R)$, $P_{\text{полез}}(R)$, $\eta(R)$ представлены на рис. 4-2.

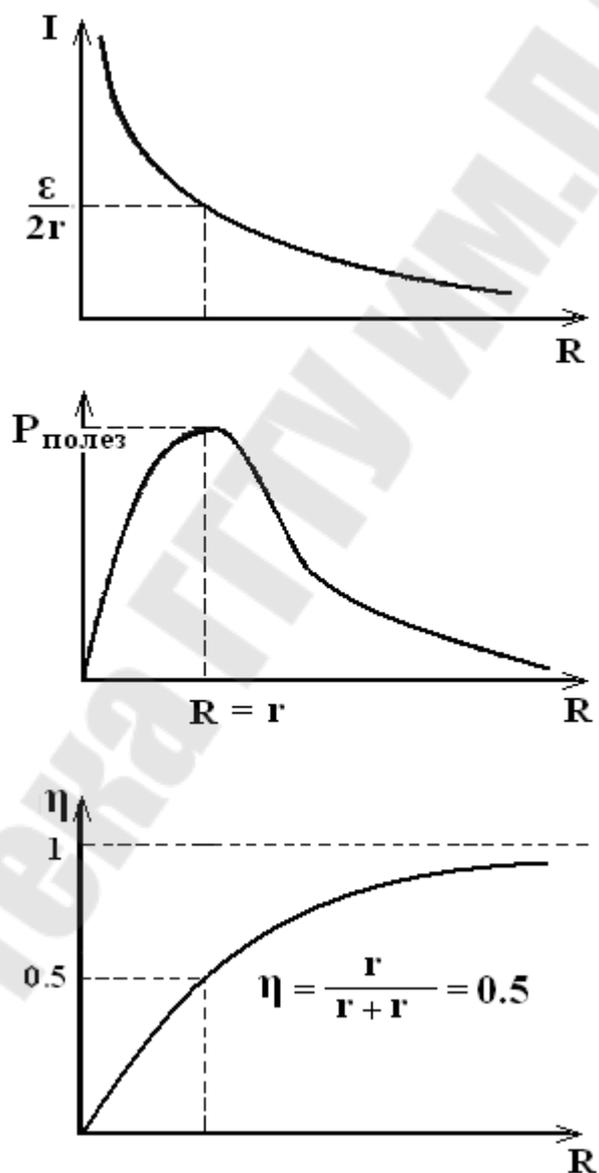


Рис. 4-2

Если ток проходит по неподвижному металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание и, по закону сохране-

ния энергии $dQ=dA$, т.е. $dQ = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt$ - это закон Джоуля – Ленца.

Если учесть, что $R = \rho \frac{dl}{dS}$; $I = jdS$, то

$$dQ = I^2 Rdt = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = \rho j^2 dVdt,$$

где $dV = dl ds$ – элементарный объем проводника, тогда

$w = \frac{dQ}{dVdt}$ - количество теплоты, выделившееся за единицу време-

ни в единице объема, называется удельной тепловой мощностью тока;

$w = \rho j^2 = \sigma E^2$ - дифференциальная форма закона Джоуля – Лен-

ца $j = \sigma E$, $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

Закон Ома позволяет рассчитать практически любую электрическую цепь. Однако расчет разветвленных цепей значительно упрощается, если использовать два правила Кирхгофа.

Первое правило: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0.$$

Второе правило: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме э.д.с. в этом контуре:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_i \varepsilon_i.$$

Рассмотрим схему (рис. 4-3). Для применения правила Кирхгофа необходимо

1. Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи;
2. Выбрать направление обхода контура;
3. Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу неизвестных величин;

Составим уравнения для электрической схемы изображенной на рис. 4-3.

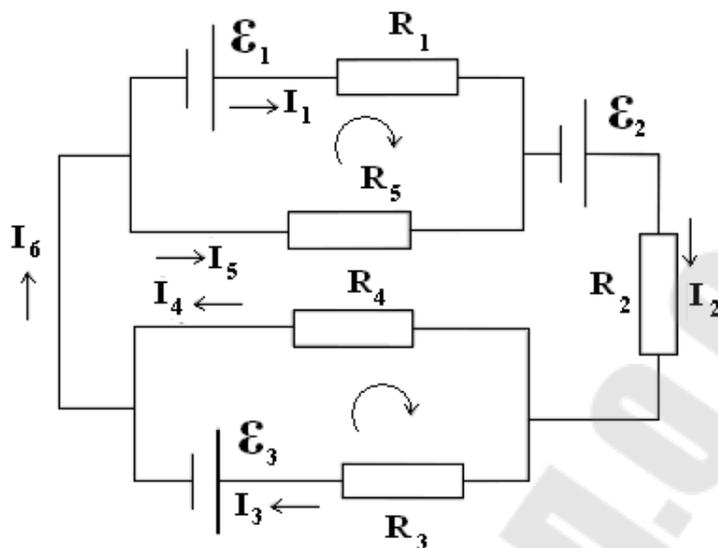


Рис. 4-3

Для узлов $I_6 - I_1 - I_5 = 0$ (токи, входящие в узел берем со знаком «+», выходящие из узла – «-»).

$$I_4 + I_3 - I_6 = 0$$

$$I_1 + I_5 - I_2 = 0$$

Для контуров: $I_1 R_1 + I_1 r_1 - I_5 R_5 = \varepsilon_1$

$$I_3 R_3 + I_3 r_3 - I_4 R_4 = -\varepsilon_3$$

Если известны все сопротивления и э.д.с., то, решая полученные уравнения, можно найти неизвестные токи.

2. Порядок выполнения работы.

Задание 1

Рассчитать полезную мощность, затраченную (полную) мощность и КПД источника.

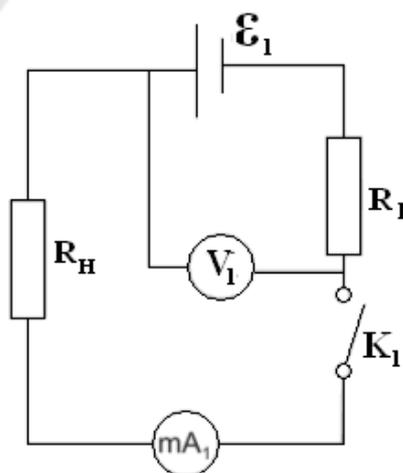


Рис. 4-4

1. Собрать электрическую схему согласно (рис.4-4).

2. Нагрузочное сопротивление R_n установить в положение " ∞ ". Включить источник питания стенда 220В (сеть) и тумблер " E_1 ". Замкнуть ключ K_1 . В данном положении R_n показания вольтметра не будут отличаться от э.д.с. источника. Записать это значение $\varepsilon_1 = \dots В$.

3. Нагрузочное сопротивление R_n установить в положение " 0 ", записать показания приборов.

Изменяя сопротивление нагрузки R_n от 0 до 750 Ом записывать показания приборов в таблицу 1.

Таблица 1

№	R, Ом	I, mA	U, В	$P_{\text{полез}},$ Вт	P, Вт	η
1	∞	0	$\varepsilon_1 = \dots В$	0	0	0
2	0					
...						

4. По формулам $P_{\text{полез}} = UI$, $P = I\varepsilon_1$; $\eta = \frac{U}{\varepsilon_1}$ рассчитать полезную

мощность, полную мощность и КПД источника тока.

5. Построить графики зависимости $I(R)$, $P_{\text{полез}}(R)$, $P(R)$ и $\eta(R)$.

На каждом графике найти характерную точку, соответствующую максимуму полезной мощности (условие $R = r$). По графику определить r . Рассчитать r через известные значения силы тока короткого замыкания ($R = 0$) и ЭДС источника. Сравнить полученные значения.

Задание 2

Найти неизвестное сопротивление R_x , используя законы Кирхгофа.

1. Собрать электрическую схему согласно рис. 4-5.

2. Нагрузочное сопротивление R_n и неизвестное сопротивление R_x установить в положение, заданное преподавателем. Включить источник питания стенда и тумблеры " E_1 " и " E_2 ".

Замкнуть ключи K_1 и K_2 .

Записать показания приборов в таблицу 2.

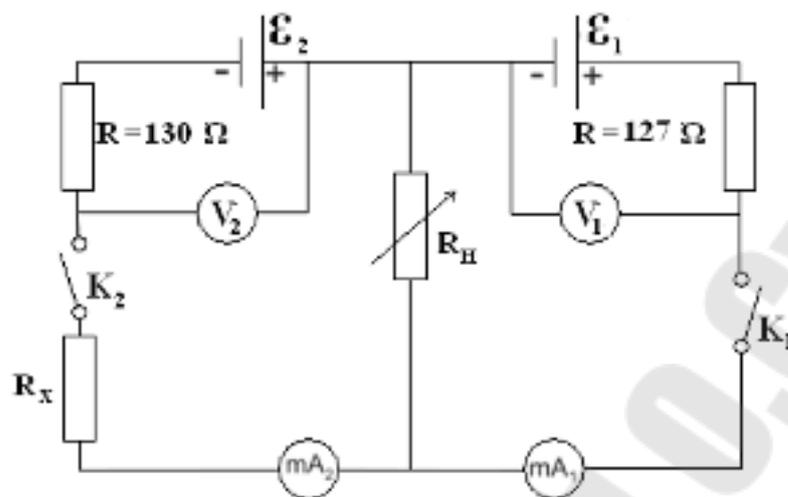


Рис. 4-5

Таблица 2

№	ε_1 , В	ε_2 , В	R_H , Ом	I_1 , mA	I_2 , mA
1					

3. Для электрической схемы рис. 4-5 составить уравнения согласно I и II законов Кирхгофа и решая их, найти неизвестное сопротивление R_x .

4. Сделать выводы

В выводе дать ответы на следующие вопросы:

1) Как зависит полная и полезная мощности от величины нагрузки?

2) Как определить максимальную полезную мощность?

3) Чему равна максимальная полная мощность?

4) Чему равен к.п.д. источника при максимальной полезной мощности?

5) В какой из двух электрических ламп, рассчитанных на одинаковое напряжение, но различных по мощности, выделится большее количество тепла при их последовательном соединении?

6) Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 2-5

Исследование зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры.

Цель работы: исследовать зависимость сопротивления проводника и полупроводника от температуры, определить величину температурного коэффициента и энергию активации полупроводника.

Приборы и принадлежности: сушильный шкаф, исследуемые образцы металла и полупроводника, два универсальных цифровых прибора В7-27, переключатель, соединительные провода.

1. Теоретическая часть

Понятие о зонной теории твёрдых тел.

В зонной теории твёрдых тел твёрдое кристаллическое тело рассматривается как строго периодическая структура, в которой ионы создают электрическое поле. Задача состоит в описании поведения электронов в этом поле. Точное решение для системы множества частиц невозможно, поэтому эта задача решается приближённо, путём сведения к задаче об одном электроне, движущемся во внешнем поле.

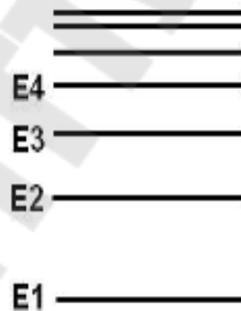


Рис. 5-1

Рассмотрим мысленно процесс образования твёрдого тела из изолированных атомов. Пока атомы изолированы, т.е. находятся друг от друга на макроскопических расстояниях, они имеют совпадающие схемы энергетических уровней. Наинизший уровень, т.е. уровень с наименьшим значением энергии E_1 , называется основным или невозбуждённым. Все остальные уровни называются возбуждёнными (рис. 5-1).

По мере сближения атомов между ними возникает все усиливающееся взаимодействие, которое приводит к изменению положения уровней. Вместо одного одинакового для всех N атомов уровня возникают N очень близких, но не совпадающих уровней. Таким образом, каждый уровень, изолированного атома расщепляется в кристалле на N густо расположенных уровней, образующих полосу или зону (рис. 5-2).

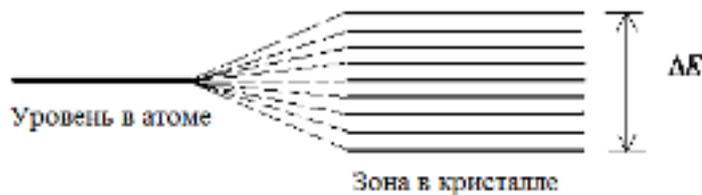


Рис. 5-2

На рис. 5-3 показано расщепление различных уровней как функция расстояния r между атомами. Величина расщепления для разных уровней не одинакова. Уровни, заполненные в атоме более близкими к ядру (внутренними) электронами, возмущаются меньше, чем уровни, заполненные внешними электронами.

Отмеченные на рисунке значения r_1 и r_2 соответствуют расстояниям между атомами в двух различных кристаллах. Из схемы видно, что возникающее в кристалле расщепление уровней, занятых внутренними электронами, очень мало. Заметно расщепляются лишь уровни, занимаемые валентными электронами. Такому же расщеплению подвергаются и более высокие уровни, не занятые электронами в основном состоянии атома.

При достаточно малых расстояниях между атомами может произойти перекрытие зон, соответствующих двум соседним уровням атома (см. пунктирную прямую, отвечающую расстоянию r_2 между атомами). Число уровней в такой слившейся зоне равно сумме количеств уровней, на которые расщепляются оба уровня атома. Взаимодействующие атомы представляют собой единую квантовую систему, в пределах которой действует принцип запрета Паули. Следовательно, $2N$ электронов, которые заполняли какой-то уровень в изолированных атомах, разместятся в кристалле попарно (с противоположными спинами) на N уровнях соответствующей полосы.

Нижние, образованные слабо расщепленными уровнями зоны заполняются электронами, каждый из которых не утрачивает и в кристалле прочной связи со своим атомом. Эти зоны и заполняющие их электроны в дальнейшем интересовать нас не будут.

Дозволенные значения энергии валентных электронов в кристалле объединяются в зоны, разделенные промежутками, в которых разрешенных значений энергии нет. Эти промежутки называются запрещенными зонами. Ширина разрешенных и запрещенных зон не зависит от размеров кристалла. Таким образом, чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Ширина разрешенных зон имеет величину порядка нескольких электронвольт. Следовательно, если кристалл содержит 10^{23} атомов, расстояние между соседними уровнями в зоне составляет $\sim 10^{-23}$ эВ.

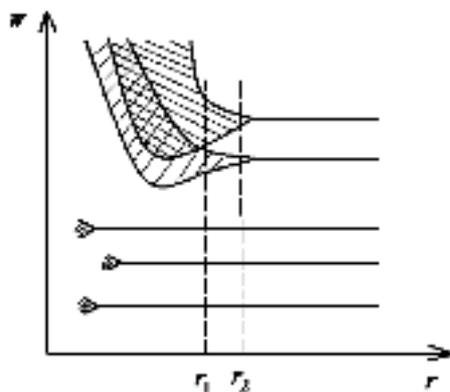


Рис. 5-3

2. Металлы, диэлектрики и полупроводники

В зонной теории твёрдого тела различия в электрических свойствах разных типов твёрдых тел объясняется шириной запрещённых энергетических зон и различным заполнением разрешённых энергетических зон.

Необходимым условием электрической проводимости твёрдого тела является наличие в разрешённой зоне свободных энергетических уровней, на которые внешнее электрическое поле могло бы перенести электроны.

Зона, заполненная электронами частично или пустая при $T = 0 \text{ К}$, называется зоной проводимости. Самая верхняя зона, полностью заполненная электронами при $T = 0 \text{ К}$, называется валентной зоной.

Если зона проводимости заполнена частично, т.е. содержит свободные, не занятые электронами уровни, твёрдое тело будет проводником, т.е. это металл (рис. 5-4,а).

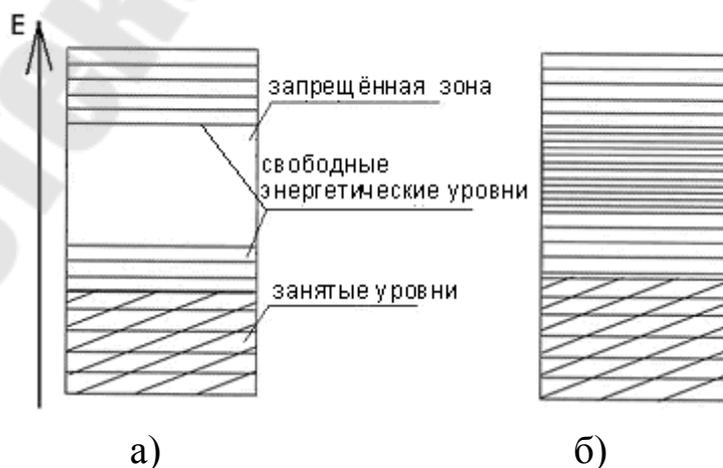




Рис. 5-4

Твёрдое тело является проводником электрического тока и в том случае, когда валентная зона перекрывается свободной зоной. Это имеет место для щелочно-земельных элементов, образующих II группу таблицы Менделеева (Be, Mg, Ca, Zn, ...) в этом случае образуется так называемая “гибридная зона”, которая заполняется валентными электронами частично (рис. 5-4,б)

Твёрдые тела, у которых энергетические зоны не перекрываются, являются диэлектриками или полупроводниками, в зависимости от ширины запрещающей зоны ΔE .

Если ширина запрещённой зоны кристалла порядка нескольких электрон-вольт ($\Delta E > 2\text{эВ}$), то тепловое движение не может перевести электроны из валентной зоны, полностью заполняемой, в зону проводимости, кристалл является диэлектриком при всех больших температурах (рис. 5-4, в).

Если ширина запрещённой зоны мала $\Delta E \leq 1\text{эВ}$, то переход электронов из валентной зоны, тоже полностью заполненной, в зону проводимости может быть осуществлён, либо путём теплового возбуждения, либо за счёт внешнего источника; кристалл является полупроводником.

3. Зависимость сопротивления металлов и полупроводников от температуры.

Удельная проводимость σ металлов вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{n_0 e^2 \lambda_F}{m u_F}$$

где n_0 – число электронов проводимости в единице объёма металла;

λ_F - средняя длина свободного пробега электрона, имеющего энергию Ферми;

u_F - скорость теплового движения электрона.

Удельная проводимость металлов обратно пропорциональна абсолютной температуре

$$\sigma \sim \frac{1}{T}.$$

Упорядоченное движение электронов в металле (электрический ток) рассматриваются в квантовой теории как процесс распространения электронных дебройлевских волн, которые рассеиваются на тепловых колебаниях узлов решётки металла. Идеальная кристаллическая решётка, в которой отсутствуют всякие нарушения периодичности, а в узлах находятся неподвижные частицы не рассеивает электронные волны и электроны проводимости проходят без сопротивления. Рассеяние электронных волн происходит при появлении неоднородностей, играющих роль центров рассеивания.

Таковыми центрами являются положительные ионы металла, совершающие тепловые колебания вокруг положений равновесия. Это рассеивание приводит к существованию у чистых металлов электрического сопротивления.

С повышением температуры возрастает рассеивание электронных волн на тепловых колебаниях узлов решётки и уменьшается средняя длина свободного пробега электронов.

Удельное сопротивление ρ металлов $\rho = \frac{1}{\sigma}$

Зависимость удельного сопротивления от температуры

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \text{ т.к. } R = \rho \frac{l}{S}, \text{ то } R = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 - сопротивление проводника при 0°C ;

$\alpha > 0$ – термический коэффициент сопротивления, приблизительно равный $\frac{1}{273} \text{K}^{-1}$.

Измерив сопротивление проводника при двух температурах t_1 и t_2 , можем найти значение α :

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1)$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2)$$

Разделим левые и правые части этих уравнений:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}, \text{ затем}$$

$$R_1(1 + \alpha t_2) = R_2(1 + \alpha t_1) \text{ и}$$

$$R_2 - R_1 = \alpha(R_1 t_2 - R_2 t_1),$$

$$\text{отсюда: } \alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}.$$

По этой формуле можно рассчитать термический коэффициент сопротивления металла.

Электропроводимость химически чистых полупроводников называется собственной проводимостью. У атома полупроводника в кристалле валентная зона заполнена полностью. Для того, чтобы электрон смог перейти из валентной зоны в зону проводимости нужно сообщить энергию, не меньшую, чем ширина ΔE запрещённой зоны.

Величина ΔE называется энергией активации. С повышением температуры полупроводника растёт число носителей тока (электронов и «дырок») участвующих в электропроводности.

Удельная электропроводимость полупроводника возрастает с ростом температуры по закону:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

А удельное сопротивление полупроводника резко уменьшается с повышением температуры по закону:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}} \text{ или } R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

где ΔE – энергия активации или ширина запрещённой зоны;
 k – постоянная Больцмана.

Измерив сопротивление полупроводника при двух температурах T_1 и T_2 можно найти значение ΔE :

$$R_1 = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_1}}, R_2 = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_2}}.$$

Прологарифмировав эти уравнения найдём их разность и решив относительно ΔE , получим:

$$\Delta E = \frac{2k(\ln R_1^2 - \ln R_2^2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}};$$

$$[\Delta E] = 1 \text{ Дж}.$$

4. Порядок выполнения работы

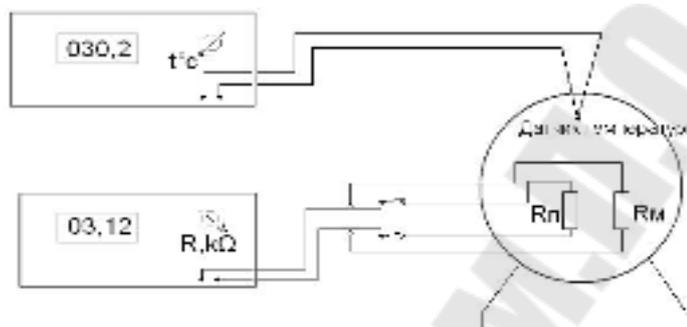


Рис. 5-5

1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.5-5.
2. Включить цифровые приборы В7-27 в сеть 220 В.
3. Подключая по очереди полупроводник и металлический проводник к прибору В7-27, работающему как омметр, записывать значения соответствующих сопротивлений через каждые 10^0 C , начиная с комнатной температуры.

Таблица 1

$t^0\text{C}$	t , КОМН.	30^0C	40^0C	50^0C	60^0C	70^0C	80^0C	90^0C	100^0C
T, К									
$R_{\text{мет}}$, Ω									
$R_{\text{п/п}}$, Ω									
$l_n R$ п/п									
$\frac{1}{T}$, K^{-1}									

4. По полученным данным построить графики зависимости сопротивления металла от температуры $R_{\text{мет}} = f(t)$ и сопротивления полупроводника от температуры $R_{\text{п/п}} = f(t)$.

5. Для любых двух точек, находящихся на линии графика $R_{мет} = f(t)$, определить значение R_1, R_2 и t_1, t_2 . По формуле

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_1 - R_2 t_2}$$
 найти термический коэффициент сопротивления металла.

6. Построить график зависимости $\ln R_{n/n} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ и по графику для любых двух точек определить значение $\ln R_{n/n_1}$, $\ln R_{n/n_2}$ и $\frac{1}{T_1}$, $\frac{1}{T_2}$;

по формуле
$$\Delta E = \frac{2k(\ln(R_{n/n_1}^2) - \ln(R_{n/n_2}^2))}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$
 рассчитать энергию

активации полупроводника.

7. По формуле $\alpha_{n/n} = \frac{\Delta E}{T^2}$ рассчитать для одной из температур значение термического коэффициента сопротивления полупроводника.

8. Сделать вывод

В выводе дать ответы на следующие вопросы:

1. Как и почему изменяется сопротивление металла с ростом температуры?

2. Почему с увеличением температуры сопротивление полупроводников убывает?

3. В чём состоит различие между металлами, диэлектриками и полупроводниками с точки зрения зонной теории?

4. Что называется энергией активации?

5. Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Лабораторная работа № 2-6 Изучение вольт - амперной характеристики полупроводникового диода

Цель работы: изучить, как квантовая теория объясняет механизм собственной и примесной проводимости полупроводников; построить графики зависимостей прямых и обратных токов полупроводниковых диодов от напряжения.

Приборы и принадлежности: источник постоянного тока, измеряющий напряжение на своих клеммах и ток нагрузки, переключатель, панель с исследуемыми диодами.

1. Теоретическая часть

Собственная проводимость полупроводников

Полупроводниками являются твёрдые тела, которые при $T=0$ характеризуются полностью занятой валентной зоной, отделённой от зоны проводимости сравнительно узкой ($\Delta E \leq 1\text{эВ}$) запрещённой зоной (рис 6-1,а)

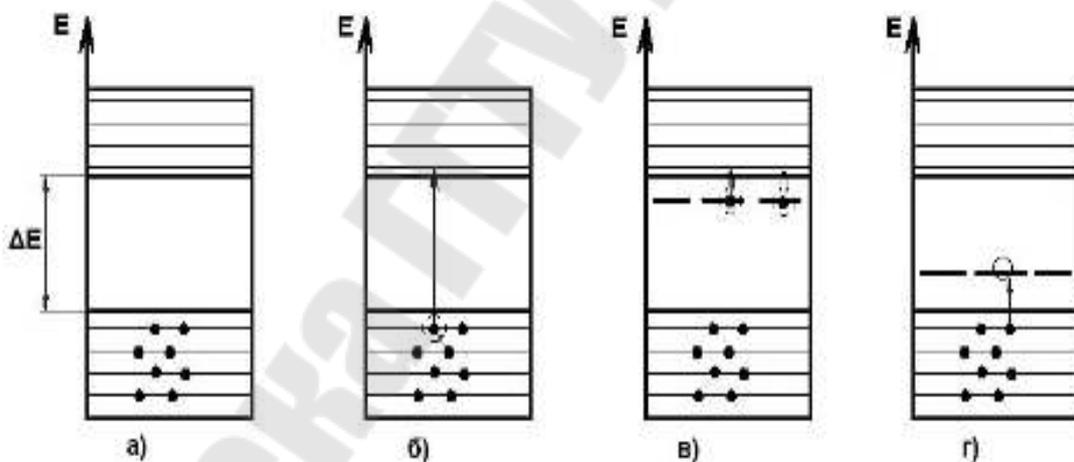


Рис. 6-1

Заполнение валентной зоны осуществляется согласно принципа Паули: в одном состоянии, описываемом четырьмя одинаковыми квантовыми числами n, l, m, m_s (главным квантовым числом, орбитальным, магнитным и магнитным спиновым), не может быть более одного электрона. В одном состоянии, описываемом тремя одинаковыми числами n, l, m , может быть не более двух электронов с противоположными спинами $s = +\frac{1}{2}$ и $s = -\frac{1}{2}$.

В природе полупроводники существуют в виде элементов IV, V, VI групп таблицы элементов Менделеева, например Si, Ge, As, Sc, Te и т.д. Различают собственные и примесные полупроводники.

Собственными полупроводниками являются химически чистые полупроводники, а их проводимость называется собственной проводимостью.

При 0К и отсутствии других внешних факторов собственные полупроводники ведут себя как диэлектрики. При повышении температуры электроны с верхних уровней валентной зоны могут перейти на нижние уровни свободной зоны (рис. 6-1,б). В свободной зоне появляются небольшое число электронов, которые могут двигаться. При наложении на кристалл электрического поля они перемещаются против поля и создают электрический ток. Свободная зона становится зоной проводимости.

Кроме того, переход электрона в верхнюю зону означает образование пустого места в валентной зоне. Такое образование называют дыркой. Наличие дырки тоже приводит к проводимости, так как теперь электрон с соседнего уровня может переместиться на место образовавшейся дырки, а дырка появится в том месте, откуда ушёл электрон, и т.д. Процесс заполнения дырок электронами равносителен перемещению дырки в направлении, противоположном движению электронов.

Таким образом, в собственных полупроводниках всегда есть два типа носителей – электроны и дырки. Число электронов в зоне проводимости равно числу дырок в валентной зоне.

Если концентрации электронов проводимости и дырок обозначить соответственно n_e и n_p , то $n_e = n_p$.

Величина проводимости зависит от количества (концентрации) перешедших в свободную зону электронов. Если воспользоваться формулой Больцмана, то

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Тогда удельная проводимость

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{env}{E} = enU_0 \text{ и}$$

$$\sigma = en_0 U_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

где ΔE - энергия активации; U_0 -подвижность электронов; v - скорость электродов; E -напряженность поля.

Примесная проводимость полупроводников

В примесных полупроводниках проводимость обусловлена за счёт введения примесей.

Введём в кристалл четырёхвалентного германия $\text{Ge}^{\text{IV}}(4\text{S}^24\text{P}^2)$ примесь пятивалентного фосфора $\text{P}^{\text{V}}(3\text{S}^23\text{P}^2)$. Четыре электрона германия образуют с четырьмя электронами фосфора прочные связи (ковалентные связи), а пятый электрон оказывается слабо связанным. Под действием теплового движения он легко отрывается от атома примеси и может двигаться по кристаллу (рис. 6-2,а)

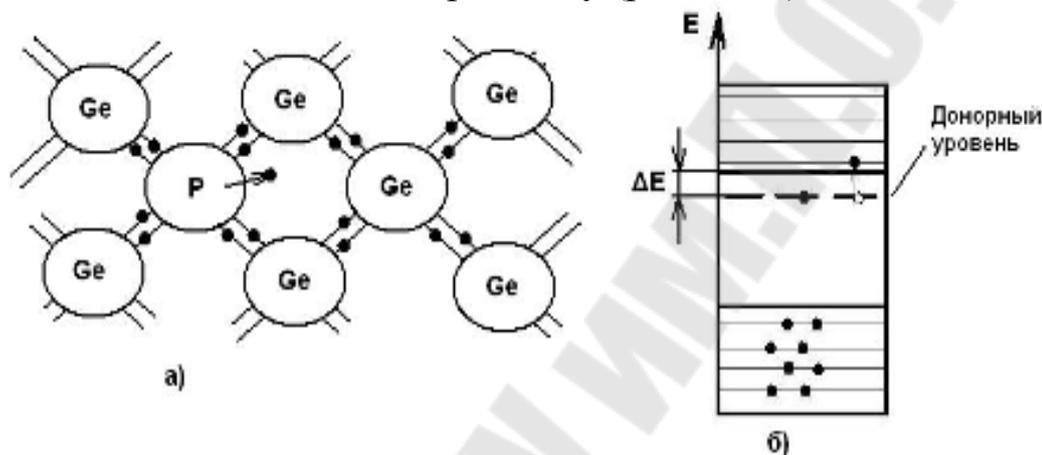


Рис. 6-2

С точки зрения зонной теории: введение примеси искажает поле решётки, что приводит к возникновению в запрещённой зоне энергетического уровня, называемого примесным уровнем. На этом локальном уровне и будет находиться лишний электрон примесного атома фосфора (рис. 6-2). Такая примесь называется донором, а уровень – донорным уровнем. Донорный уровень находится на малом расстоянии от дна зоны проводимости. Это расстояние называется энергией активации ΔE ($\Delta E \approx 0.015$ эВ). При комнатных температурах энергия теплового движения достаточна для того, чтобы электрон примесного уровня перешёл в зону проводимости. Образующиеся при этом дырки в проводимости не участвуют.

Итак, в полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу больше валентностей основных атомов, носителями тока являются электроны. Полупроводник с такой проводимостью называется полупроводником n-типа (от слова negative, что означает, что носители тока имеют отрицательный заряд).

Введём в кристалл четырёхвалентного германия $\text{Ge}^{\text{IV}}(4\text{S}^24\text{P}^2)$ примесь трёхвалентного бора $\text{B}^{\text{III}}(2\text{S}^22\text{P}^1)$. Для образования четырёх

ковалентных связей у атома бора не хватает одного электрона, т.е. одна из связей остаётся неуполноценной и четвёртый электрон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества, где образуется дырка (рис. 6-3, а). Последовательное заполнение образующихся дырок электронами эквивалентно движению дырок в полупроводнике.

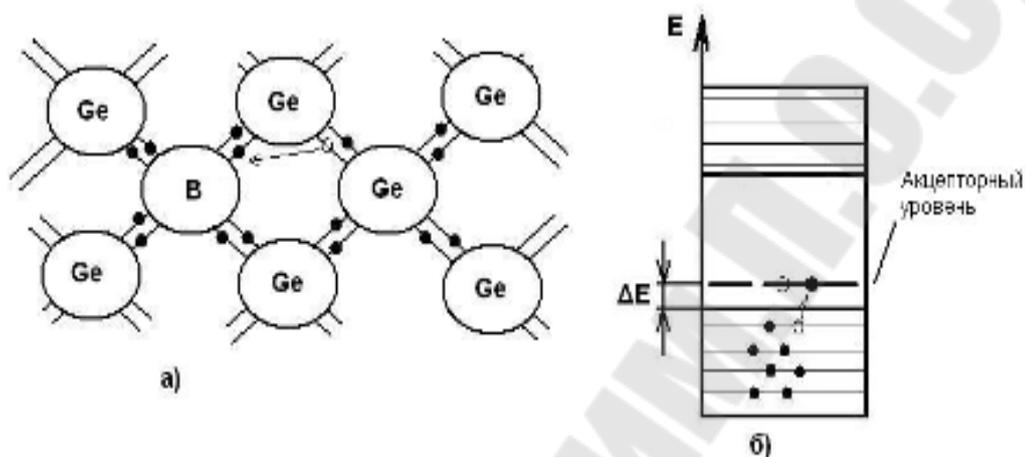


Рис. 6-3

С точки зрения зонной теории: введение трёхвалентной примеси искажает решётку германия и приводит к возникновению в запрещённой зоне примесного энергетического уровня не занятого электронами. Этот уровень располагается выше верхнего края валентной зоны, называется акцепторным уровнем (рис. 6-3, б). При сравнительно низких температурах электроны из валентной зоны переходят на акцепторный уровень, теряют способность перемещаться по решётке германия, т.е. в проводимости не участвуют. Носителями тока являются лишь дырки, возникающие в валентной зоне.

Итак, в полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, носителями тока являются дырки. Возникает дырочная проводимость р-типа (от слова positive, что означает, что носители тока имеют положительный заряд).

Полупроводниковый диод

Возьмём пластину n-полупроводника и пластину p-проводника и приведём их в соприкосновение. Получим полупроводниковый диод. Электроны из n-полупроводника, где их концентрация выше, будут диффундировать в p-полупроводник, где их концентрация ниже. Диффузия дырок происходит в обратном направлении (рис. 6-4). В n-полупроводнике, из-за ухода электронов, вблизи границы остаётся

нескомпенсированный положительный заряд неподвижных ионизированных донорных атомов.

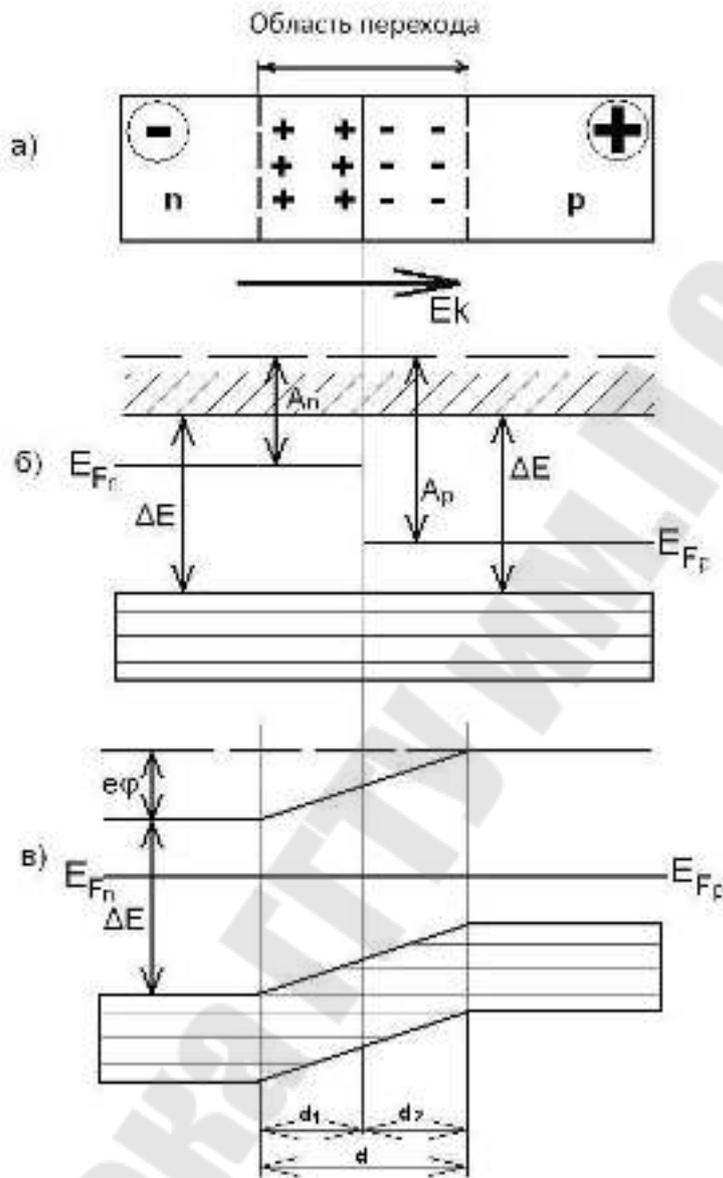


Рис. 6-4, см. [1, стр. 461]

В р-полупроводнике вблизи границы образуется отрицательный заряд неподвижных ионизированных акцепторов. У границы образуется двойной электрический слой (запирающий слой), поле которого, направлено от n-области к р-области. Если концентрация доноров и акцепторов в полупроводниках n- и р-типа одинаковы, то толщина слоёв d_1 и d_2 равны.

В области р-n-перехода энергетические зоны искривляются, в результате чего возникают потенциальные барьеры, как для электро-

нов, так и для дырок. Высота потенциального барьера $e\phi$. Все энергетические уровни акцепторного полупроводника подняты относительно уровней донорного полупроводника, причём подъём происходит на толщине двойного слоя d . Носители тока способны преодолеть такую разность потенциалов лишь при температуре в несколько тысяч градусов, т.е. при обычных температурах равновесный контактный слой является запирающим.

Сопротивление запирающего слоя можно уменьшить с помощью внешнего электрического поля.

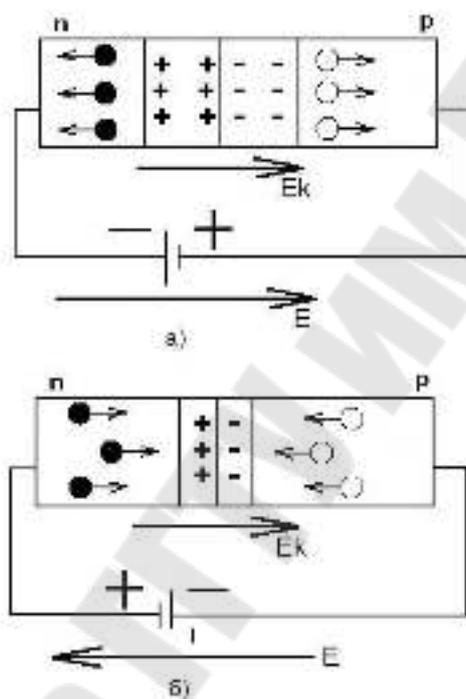


Рис. 6-5

Если приложенное к p-n-переходу внешнее электрическое поле направлено от n-полупроводника к p-полупроводнику (рис. 6-5, а), т.е. совпадает с направлением поля контактного слоя, то запирающий слой расширяется и его сопротивление растёт.

Ток через p-n-переход в этом случае не проходит. Незначительный ток образуется лишь за счёт неосновных носителей тока (электронов в p-проводнике и дырок в n-проводнике).

Если с помощью источника ЭДС создать в p-n-переходе электрическое поле \vec{E} направленное против поля барьера, то в результате ширина барьера и его сопротивление уменьшается (рис. 6-5, б). Следовательно, в этом направлении электрический ток проходит через p-n-переход и называется прямым.

Таким образом, контакт полупроводников с разными типами проводимости образует р-п-переход обладающий свойством односторонней проводимости электрического тока.

Односторонняя проводимость р-п-перехода используется для выпрямления и преобразования переменного электрического тока. Полупроводниковое устройство, содержащее один р-п-переход, называется полупроводниковым диодом. Вольт - амперная характеристика диода приведена на рис 6-6.



Рис. 6-6

2. Порядок выполнения работы.

1. Перед включением установки в сеть проверить электрическую схему рис. 6-7.
2. Переключатель Вк 1 установить в положение 1 (прямое).
3. Подключить к клеммам переключателя прибора селеновый диод.

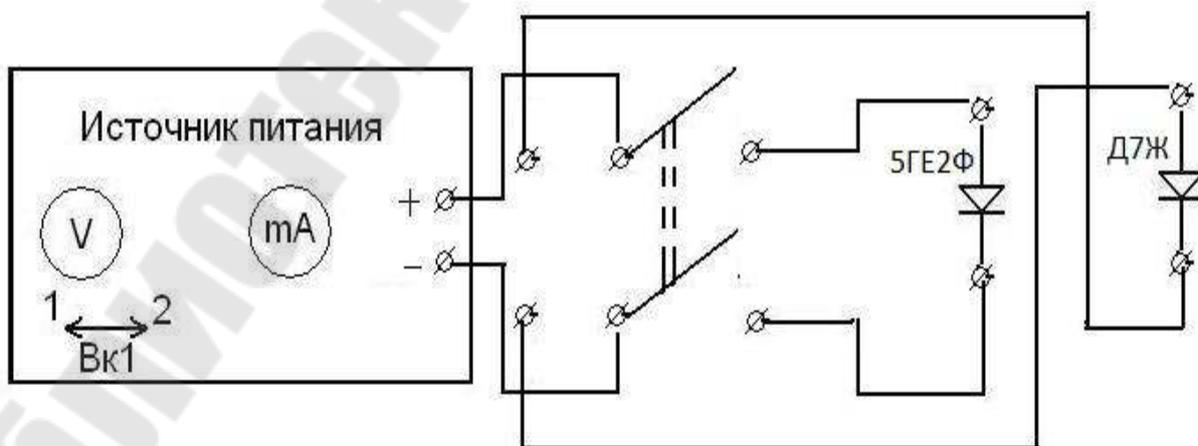


Рис. 6-7

4. Определить цену деления приборов (вольтметра и миллиамперметра) на всех пределах измерений

$$C_V^I = \dots \frac{B}{дел} (0 \sim 1.5B); \quad C_{mA}^I = \dots \frac{mA}{дел} (0 \sim 25mA);$$

$$C_V^{II} = \dots \frac{B}{дел} (0 \sim 15B); \quad C_{mA}^{II} = \dots \frac{mA}{дел} (0 \sim 250mA).$$

5. Включить установку в сеть 220 В.

6. Изменяя величину приложенного напряжения в пределах от 0 до 15 В, определить величину тока, проходящего через диод. Данные занести в таблицу 6-1.

7. Уменьшить напряжение до нуля.

8. Переключатель Вк 1 установить в положение 2 (обратное). Изменяя напряжение в пределах от 0 до 15 В, определить величину обратного тока. Данные занести в таблицу 6-1.

9. Уменьшить напряжение до нуля.

Подключить германиевый диод. Пункты 6-8 повторить для германиевого диода.

10. Построить вольт - амперную характеристику диодов.

11. Вычислить коэффициент выпрямления селенового диода

$$k = \frac{I_{пр}}{I_{обр}} \text{ (отношение прямого тока к обратному при одинаковых абсолютных значениях напряжения).}$$

12. Построить график $k(u)$

Таблица 6-1

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Селеновый диод 5ГЕ2Ф	Прямое включение	U, В										
		I, mA										
	Обратное включение	U, В										
		I, mA										
Германиевый диод Д7Ж	Прямое Включение	U, В										
		I, mA										
	Обратное Включение	U, В										
		I, mA										
Кремниевый диод Д815А	Прямое включение	U, В										
		I, mA										
	Обратное включение	U, В										
		I, mA										

12. Сделать выводы

В выводах дать ответы на следующие вопросы:

- 1) Что такое «запирающий слой» и какими свойствами он обладает?
- 2) Как надо подключать внешний источник постоянного напряжения, чтобы через р-п переход проходил ток?
- 3) Как по вольт - амперной характеристике полупроводникового диода определить, где ток прямой, а где – обратный?
- 4) Какие значения может принимать коэффициент выпрямления? Как выглядит зависимость коэффициента выпрямления от напряжения $I = k(u)$?
- 5) Сделать выводы по результатам проделанной работы

Лабораторная работа № 2-7 Изучение работы электронного осциллографа.

Цель работы: ознакомиться с работой электронно-лучевого осциллографа; научиться наблюдать на экране осциллографа форму периодических и непериодических сигналов; научиться измерять амплитуду, длительность, период электрических сигналов; научиться получать функциональные зависимости между двумя сигналами.

Приборы и оборудование: электронно-лучевые осциллографы типа С1-68, С1-83 и др.; генераторы сигналов синусоидальной и специальной формы типа Г6-28 и Г4-106; вольтметр; миллиамперметр; источники питания.

1. Теоретическая часть

Электронно-лучевой осциллограф применяют для наблюдения формы, регистрации и измерения амплитудных и временных параметров электрических сигналов. С помощью осциллографа можно измерить частоту, длительность импульса, длительность фронта, период повторения, сдвиг фаз между двумя сигналами и др.

Осциллограф может также использоваться для исследования неэлектрических процессов при условии, что последние преобразуются в электрические сигналы.

Современные осциллографы позволяют исследовать сигналы в диапазоне частот от 0 до 10^{12} Гц. Погрешность измерения с помощью осциллографа составляет, как правило, 3-12 %.

Стандартный электронно-лучевой осциллограф состоит из следующих функциональных блоков (рис.7-1):

- электронно-лучевой трубки (ЭЛТ);
- входного делителя (аттенюатора);
- усилителя вертикального отклонения;
- схемы синхронизации и запуска генератора развертки;
- генератора развертки (ГР);
- усилителя горизонтального отклонения;
- калибратора амплитуды и длительности;
- блока питания (не показан).

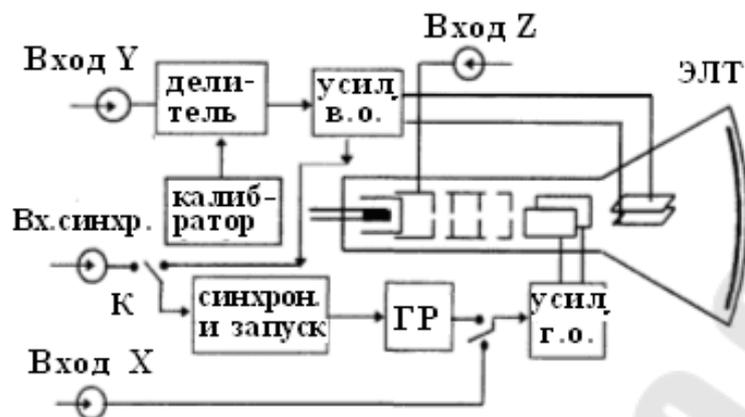


Рис. 7-1 Блок-схема электронно-лучевого осциллографа.

Электронно-лучевая трубка

Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка, преобразующая электрический сигнал в видимое изображение. Электронно-лучевая трубка (рис. 7-2) представляет собой вакуумированную колбу с системой электродов, включающей нить накала Н, катод К, модулятор М, первый А₁ и второй А₂ аноды и две пары пластин - вертикального Y и горизонтального X отклонения луча.

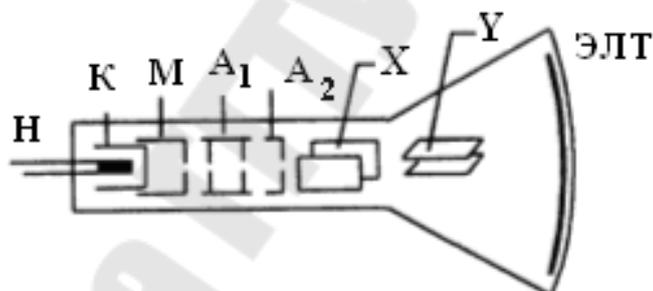


Рис. 7-2 Электронно-лучевая трубка

Электроны, вылетевшие из нагретого катода, попадают в поле модулятора (управляющего электрода), который находится под отрицательным потенциалом к катоду. Интенсивность пучка, выходящего за пределы модулятора, а следовательно, и яркость свечения пятна на экране регулируются изменением потенциала модулятора.

Дальнейшее формирование пучка происходит под действием напряжения, приложенного к двум анодам, один из которых является ускоряющим, другой -фокусирующим. Система электродов: накал, катод, модулятор и аноды образует так называемую электронную пушку, назначение которой сформировать узкий электронный пучок (луч) необходимой интенсивности.

Электронный пучок, пройдя между двумя парами взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин, попадает на люминесцентный экран, вызывая его свечение. В зависимости от типа люминофора свечение может продолжаться от нескольких микросекунд до десятков секунд.

Генератор развертки

Для получения на экране осциллографа временной зависимости сигнала, поданного на вход Y , необходимо электронный луч перемещать в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Для этого на пластины X следует подать пилообразное напряжение (рис.7-3), называемое напряжением развертки. Последнее вырабатывается специальным генератором развертки. При возрастании пилообразного напряжения за время роста напряжения t_1 луч переместится по горизонтали слева направо, а за время спада напряжения t_2 луч возвращается в исходное состояние. Таким образом, за время $T=t_1+t_2$, называемое периодом развертки, луч осуществит прямой и обратный ход. Пилообразное напряжение формируется так, чтобы $t_1 \gg t_2$, т.е. $T \approx t_1$

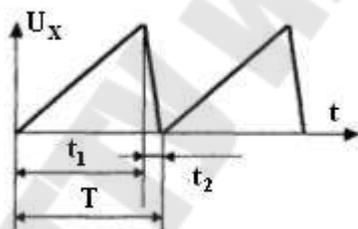


Рис. 7-3 Пилообразное напряжение развертки

Из-за большой скорости и специального гашения запирающим напряжением обратный ход луча обычно не просматривается.

Поскольку напряжение на пластинах X возрастает пропорционально времени, то ось X можно отождествить с осью времени.

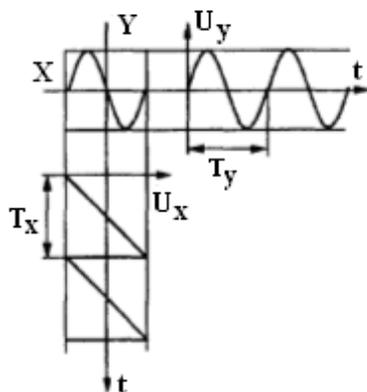


Рис.7-4 Развертка синусоидального сигнала во времени

Если во время развертки к вертикально отклоняющим пластинам Y приложить исследуемое напряжение, то положение луча в каждый момент времени будет однозначно соответствовать значению этого напряжения и на экране осциллографа будет виден участок исследуемого сигнала (рис. 7-4). Затем напряжение пилы резко падает до нуля и луч возвращается в исходное положение. При следующем периоде пилы на экране появится новый участок исследуемого сигнала.

Очевидно, что при равенстве периодов исследуемого напряжения T_y и развертки T_x на экране получится один период исследуемого сигнала. При $T_x = nT_y$ (n - целое число) осциллограмма будет представлять собой неподвижную кривую из n периодов исследуемого напряжения. При небольших отклонениях от этого условия осциллограмма будет двигаться вдоль оси X . Возникнет эффект бегущего изображения или же экран будет заполнен семейством сдвинутых относительно друг друга кривых. Устойчивость изображения достигается при помощи схемы синхронизации.

Блок синхронизации

Как указывалось выше, при несовпадении периодов исследуемого сигнала и развертки осциллограмма будет перемещаться по экрану. Для устранения этого недостатка в осциллографе предусмотрен блок синхронизации.

Синхронизация - процесс, при котором работа генератора развертки становится зависимой от исследуемого сигнала.

Режим синхронизации может быть внутренним и внешним. При работе осциллографа в режиме внутренней синхронизации из канала вертикального отклонения снимается часть усиленного исследуемого сигнала и подается на вход схемы синхронизации. Последняя совместно со схемой запуска генератора развертки вырабатывает короткие импульсы определенной формы, полярности и амплитуды.

Усилитель вертикального отклонения

Поскольку чувствительность трубки довольно низкая (в лучшем случае несколько вольт на 1 см), то для наблюдения слабых сигналов необходимо использовать усилители.

Калибратор

При проведении измерений амплитудных и временных характеристик сигналов необходима калибровка масштабов по осям Y и X . Для этого в осциллографах имеется источник импульсных сигналов с известной амплитудой и длительностью, называемый калибратором.

С выхода калибратора напряжение подается на вход Y , после чего проверяется соответствие амплитудных и временных параметров калибровочного сигнала положению переключателей чувствительности осциллографа по осям X и Y . В случае несоответствия необходимо ввести коррекцию коэффициента усиления специальным сопротивлением, выведенным "под шлиц" и обозначенным значком Y по оси Y и по оси X соответственно.

Внимание! При калибровке и измерениях ручки плавной регулировки амплитуды и длительности должны быть повернуты по часовой стрелке до упора.

Погрешности: в любом осциллографе погрешности измерений складываются из нескольких источников: погрешности калибровки, нелинейной зависимости отклонения луча по вертикали от входного напряжения, зависимости коэффициента усиления от частоты, погрешности входного усилителя, нелинейности развертки во времени и т.д.

Принцип получения осциллограмм

Если к пластинам X или Y приложить разность потенциалов, то электронный луч будет отклоняться в горизонтальном или вертикальном направлении. Это отклонение h прямо пропорционально отклоняющему напряжению U , приложенному к пластинам $h=US$, где S - чувствительность трубки, которая, в свою очередь, зависит от конструктивных особенностей трубки и напряжения на ускоряющем аноде.

Если на вертикально отклоняющие пластины Y подать переменное напряжение, например, синусоидальной формы, то электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении и на экране образуется вертикальная линия. Если такое же напряжение подать только на горизонтально отклоняющие пластины X , то на экране будет светящаяся горизонтальная линия.

При одновременном воздействии переменных напряжений на обе пары пластин можно получить различные осциллограммы в зависимости от соотношения формы, фазы и частоты этих напряжений. В случае синусоидальных сигналов с одинаковыми частотами и совпадающими фазами на экране получится прямая линия (рис. 7-5, а), угол наклона которой зависит от отношения амплитуд. При равных частотах, но различных фазах получится эллипс (рис. 7-5, б).

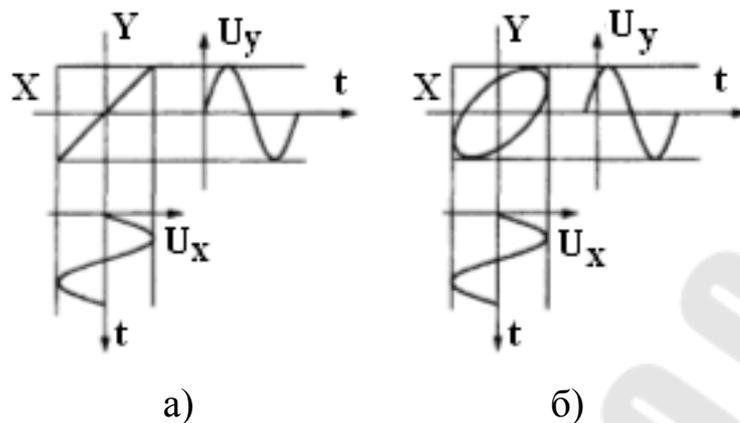


Рис. 7-5 Сложение синусоидальных сигналов

2. Порядок выполнения работы

I. Подготовка осциллографа к измерениям

Включите осциллограф в сеть 220В и дайте ему прогреться 3-5 мин. Если луч на экране отсутствует, то:

а) ручку “☀”, расположенную слева от экрана ЭЛТ, поставить в крайнее правое положение;

б) переключатель “однократ. ждущ, АВТ” генератора развертки установить в нижнее положение “АВТ” – автоматический режим;

в) вращая ручки “↔” и “↑” вывести луч на середину экран.

г) ручку «род работы» установить в положение “~” или “~”.

II. Определение чувствительности осциллографа

Собрать электрическую схему рис. 7-6

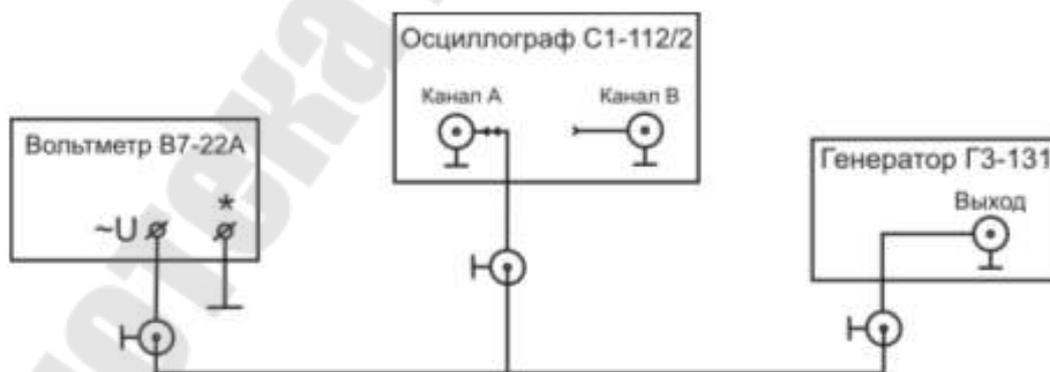


Рис. 7-6 Блок-схема для снятия АЧХ осциллографа

Включить в сеть 220В вольтметр В7-22А и генератор низкой частоты.

Вращая ручку “АМПЛ” низкочастотного генератора, установить на вольтметре напряжение U_v , заданное преподавателем.

Переключателем “ $V/\text{дел}$ ” и ручкой “ \updownarrow ” канала А установить удобный размер изображения.

Вращая ручки “уров” и “плавно” получить устойчивое изображение синусоиды.

По формуле $k = \frac{U_V \sqrt{2}}{n}$ найти чувствительность осциллографа, где n – число малых делений по вертикали.

III. Измерение амплитуды и частоты гармонического сигнала

Пользуясь инструкцией по эксплуатации осциллографа, произвести калибровку каналов вертикального и горизонтального отклонения.

От низкочастотного генератора подать на вход А синусоидальный сигнал с частотой и напряжением заданным преподавателем.

Поддерживая на экране осциллографа устойчивое изображение синусоиды, измерить амплитуду сигнала в делениях шкалы осциллографа $U_N = \dots$ дел (больших). Определить результат измерения путем

умножения коэффициентов отклонения по вертикали “ $V/\text{дел}$ ” на линейные размеры изображения $U_0 = k_1 \cdot U_N$ (В).

Сравнить полученные значения с показанием вольтметра U_V .

Учесть, что $U_{осц.} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

Измерить период сигнала в делениях шкалы осциллографа $T_N = \dots$ дел (больших). Умножить период сигнала на коэффициент раз-

вертки по горизонтали “ $\frac{\text{время}}{\text{дел}}$ ” и получить $T = k_2 \cdot T_N$ (с).

По формуле $\nu_{осц} = \frac{1}{T}$ определить частоту колебаний. Сравнить полученное значение $\nu_{осц}$ с показанием индикатора низкочастотного генератора $\nu_{ген}$.

IV. Снятие частотной характеристики осциллографа

Подать на вход А осциллографа синусоидальный сигнал от низкочастотного генератора напряжением U_V , заданным преподавателем.

Изменяя частоту сигнала в диапазоне от 20 Гц до 1 МГц измерить амплитуду сигнала с помощью осциллографа, $U_{осц} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$, подерживая постоянным напряжением U_V на входе осциллографа.

Для заданных частот вычислить отношение $\frac{U_V}{U_{осц}}$.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Построить график зависимости $m(\nu)$, где $m = \frac{U_V}{U_{осц}}$. По оси абсцисс (ось x) отложить $\lg \nu$, а по оси ординат (ось y) отложить отношение $m = \frac{U_V}{U_{осц}}$.

Таблица 1

№	ν , Гц	U_0 , В	$U_{осц}$	U_V	$\frac{U_V}{U_{осц}}$	$\lg \nu$
1	20					
2	200					
3	2000					
4	20000					
5	200000					
6	1000000					

Сделать выводы

В выводе дать ответа на следующие вопросы:

Для измерения каких характеристик электрических сигналов удобно применять осциллограф?

Как получить устойчивое изображение сигнала на экране осциллографа?

Для какой цели нужна калибровка?

Лабораторная работа № 2-15

Измерение емкости конденсатора с помощью гальванометра.

Цель работы: изучить метод измерения емкости конденсатора с помощью гальванометра и проверить справедливость формул для последовательного и параллельного соединения конденсаторов

Приборы и принадлежности: универсальный источник питания УИП-2, вольтметр, гальванометр, двухполюсный переключатель, панель с эталонным конденсатором и конденсаторами неизвестной емкости, соединительные провода.

1. Теоретическая часть

Проводники – тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему объему. Проводники делятся на две группы: 1) проводники первого рода (металлы) – перенесение в них зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями; 2) проводники второго рода (растворы солей, кислот) – перенесение в них зарядов (положительных и отрицательных ионов) ведет к химическим изменениям.

Если металлический проводник внести во внешнее электростатическое поле, то под действием этого поля электроны проводимости перераспределяются в проводнике таким образом, чтобы в любой точке внутри проводника электрическое поле электронов проводимости и положительных ионов скомпенсировало внешнее поле.

Перераспределение зарядов в проводнике под влиянием внешнего электростатического поля называется явлением электростатической индукции.

Итак, для проводника в электростатическом поле выполняются следующие условия:

- 1) Всюду внутри проводника напряженность поля $\vec{E} = 0$
- 2) Весь объем проводника эквипотенциален, т.е. потенциал во всех точках внутри проводника постоянен $\varphi = \text{const}$
- 3) Поверхность проводника эквипотенциальна
- 4) Если проводнику сообщить некоторый заряд, то нескомпенсированные заряды располагаются только на поверхности проводника.

Уединенным проводником называется проводник, который находится столь далеко от других тел, что влиянием их электрических полей можно пренебречь. Характер распределения зарядов по поверхности заряженного уединенного проводника, находящегося в од-

нородной, изотропной диэлектрической среде, зависит только от формы поверхности проводника.

Потенциал уединенного проводника прямо пропорционален его заряду

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{S_{\text{провод.}}} \frac{\sigma ds}{r}, \text{ где } \sigma ds = q, \text{ т.е. } \varphi = \frac{q}{C}, \text{ где } C = \frac{q}{\varphi} - \text{элек-}$$

троемкость уединенного проводника, а потенциал уединенного проводящего шара $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon R}$, то емкость шара будет: $C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$.

Единица емкости – фарад (Ф).

Из формулы видно, для того чтобы проводник обладал большой емкостью, он должен иметь очень большие размеры. Практический интерес представляют устройства, обладающие способностью при малых размерах накапливать значительные по величине заряды, т.е. обладать большой емкостью. Эти устройства называются конденсаторами.

Конденсаторы представляют систему из двух проводников, форма и взаимное расположения которых, таковы, что электростатическое поле этих проводников при сообщении им равных по абсолютному значению и противоположных по знаку электрических зарядов сосредоточено в узком зазоре между ними, т.е. обкладками конденсатора.

Под емкостью конденсатора понимается физическая величина, равная отношению заряда, накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между его обкладками

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

В зависимости от формы обкладок конденсаторы делятся на плоские, цилиндрические и сферические.

Плоский конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга. Заряды пластин $+q$ и $-q$ (рис. 15-1).

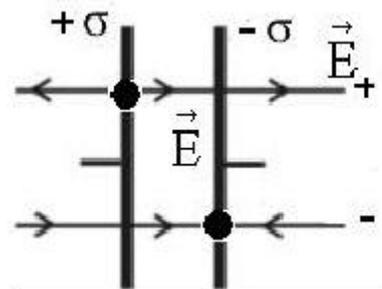


Рис. 15-1.

Разность потенциалов между обкладками конденсатора

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0} d; \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0},$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками. Тогда, заменив $q = \sigma S$

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\sigma S \varepsilon \varepsilon_0}{\sigma d} = \frac{S \varepsilon \varepsilon_0}{d}.$$

Сферический конденсатор состоит из двух концентрических металлических обкладок сферической формы, радиусы которых R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$).

Напряженность поля в конденсаторе направлена радиально и равна $E = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r^2}$.

Разность потенциалов между обкладками конденсатора:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q}{\varepsilon r^2} dr = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

Цилиндрический конденсатор состоит из двух соосных тонкостенных металлических цилиндров высотой l и радиусами R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$). Напряженность поля между обкладками конденсатора равна

$$E = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon r}, \quad \text{где } \tau = \frac{dq}{dl} \text{ - линейная плотность зарядов.}$$

Разность потенциалов между обкладками конденсатора:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\tau dr}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon r} = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \ln \frac{R_2}{R_1},$$

а емкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\tau l 2\pi \varepsilon \varepsilon_0}{\tau \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{l 2\pi \varepsilon \varepsilon_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Итак, емкость конденсаторов зависит от диэлектрической проницаемости среды, заполняющей пространство между обкладками.

Конденсаторы характеризуются не только их электрической емкостью, но также пробивным напряжением (напряжением пробоя) –

минимальная разность потенциалов между обкладками конденсатора при которой происходит пробой (электрический заряд через слой диэлектрика).

При параллельном соединении конденсаторов в батарею (рис. 15-2), все конденсаторы такой батареи имеют одинаковую разность потенциалов на обкладках $\Delta\varphi$.

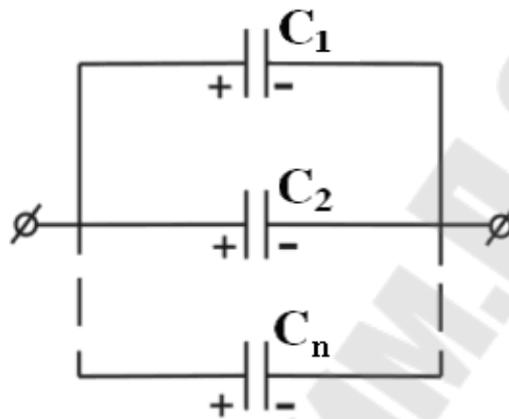


Рис. 15-2

Если емкости конденсаторов C_1, C_2, \dots, C_n , то

$$q_1 = C_1 \Delta\varphi$$

$$q_2 = C_2 \Delta\varphi$$

...

$$q_n = C_n \Delta\varphi,$$

а заряд батареи конденсаторов $q = \sum_{i=1}^n q_i = \Delta\varphi(C_1 + C_2 + \dots + C_n)$.

Полная емкость батареи $C = \frac{q}{\Delta\varphi} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i$, т.е.

емкость батареи конденсаторов, соединенных параллельно, равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

Последовательное соединение конденсаторов показано на рис. 15-3.

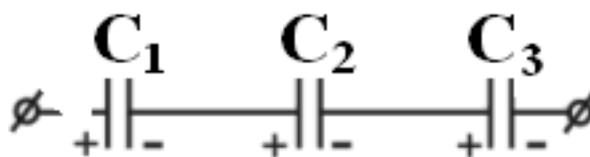


Рис. 15-3

При последовательном соединении конденсаторов в батарею заряды всех конденсаторов одинаковы, а разность потенциалов батареи равна сумме разностей потенциалов на каждом из конденсаторов

$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \sum_{i=1}^n \frac{q}{C_i} = q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

$$\text{Откуда: } \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}; \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n},$$

т.е. при последовательном соединении конденсаторов результирующая емкость меньше наименьшей емкости, используемой в батарее.

2. Методика измерения емкости конденсатора с помощью гальванометра.

С помощью гальванометра можно измерить не только силу тока, но и величину заряда на конденсаторе. В работе используем гальванометр магнитоэлектрической системы и будем считать, что трение при движении рамки настолько мало, что им можно пренебречь. На рис. 15-4 приведена схема для нахождения (сравнения) емкостей. Положим, что мы замкнули на гальванометр заряженный конденсатор. Конденсатор начинает разряжаться и по гальванометру течет кратковременный “импульс” тока. Время “импульса” тока “ τ ” мало по сравнению с периодом колебаний рамки $\tau \ll T$, поэтому рамка колеблется (отклоняется) с частотой собственных колебаний $\omega = \omega_0$: Момент силы, действующий на рамку, пропорционален току $M = k \cdot i$;

$$\int_{\tau} M dt = k \int_{\tau} i dt = k \cdot q,$$

где q – заряд прошедший через гальванометр;
 k – некоторая константа.

Угол поворота рамки пропорциональным вращающему моменту силы, действующему на рамку, $M = -f \cdot \alpha$, где f – коэффициент жесткости пружины (растяжки).

Период крутильных колебаний рамки $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{f}}$, где I – момент инерции рамки. По основному закону динамики вращательного движения:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}; \quad d\vec{L} = \vec{M} \cdot dt \quad \vec{L} = I \cdot \vec{\omega}; \quad W = \frac{I\omega^2}{2}; \quad L = \int_{\tau} M dt = I \cdot \omega_0 = k \cdot q.$$

$$\text{Тогда } I\omega = k \cdot q \text{ откуда } q = \frac{I\omega_0}{k}$$

Рамка получившая момент импульса “ L ” начнет поворачиваться и ее кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию закрученного на угол подвеса. По закону сохранения энергии:

$$\frac{1}{2}Iw_0^2 = \frac{1}{2}f\alpha^2 \text{ откуда } Iw^2 = f\alpha^2 \Rightarrow w_0 = \sqrt{\frac{f\alpha^2}{I}}$$

$$\text{Из формулы } q = \frac{I}{k} \cdot w_0 = \frac{\alpha}{k} \sqrt{\frac{f}{I}} \cdot I = \frac{\alpha}{k} \sqrt{fI} = \beta \cdot \alpha,$$

где $\beta = \frac{1}{k} \sqrt{fI}$ - постоянная для данного прибора.

Постоянную прибора “ β ” исключим из расчетов, зная эталонную емкость и напряжение зарядки, фиксируя максимальное показание гальванометра α .

$$q = \beta \cdot \alpha, \text{ где } \beta = \frac{1}{k} \sqrt{fI}$$

Если в схему рис. 15-4 один раз включить конденсатор $C_{эм}$, другой раз – C_x , то:

$$C_{эм} = \frac{\beta\alpha_{эм}}{U}, C_x = \frac{\beta\alpha_x}{U}.$$

Разделив почленно эти уравнения, получим:

$$\frac{\alpha_{эм}}{\alpha_x} = \frac{C_{эм}}{C_x}, \text{ откуда } C_x = \frac{\alpha_{эм}}{\alpha_x} C_{эм}.$$

3. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему согласно рис. 15-4.

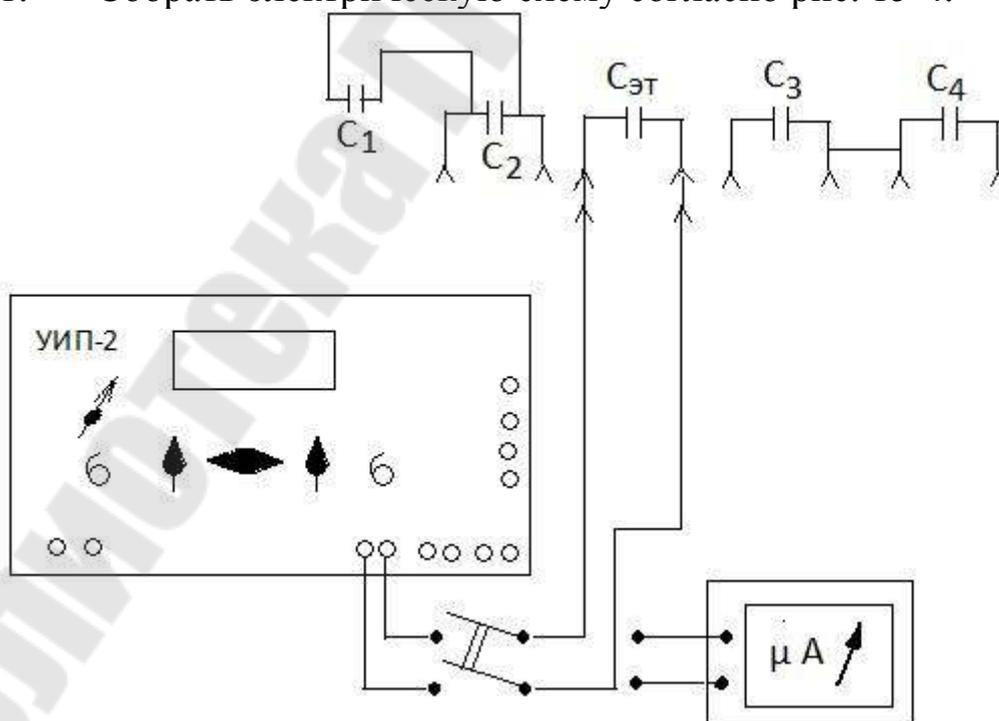


Рис.15-4

2. Универсальный источник питания (УИП-2) включить в сеть и установить напряжение, заданное преподавателем $U = \dots \pm \Delta U$, В.

3. Включить в сеть гальванометр и убедиться, что световой указатель стоит на нуле.

4. С помощью переключателя замкнуть конденсатор известной емкости $C_{эм} = \dots$ пФ на источник напряжения и зарядить конденсатор.

5. При помощи переключателя переключить конденсатор на гальванометр, замечая при этом максимальное отклонение “зайчика”

по шкале “ $n_{эм}$ ” (проделать 3-7 раз) $\bar{n}_{эм} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i^{эм}$.

6. По формуле $\beta = \frac{C_{эм} \cdot U}{n_{эм}}$ найти постоянную прибора

7. Вместо эталонной емкости подключить конденсатор неизвестной емкости C_{1x} и повторить пункты 4-5.

8. Зная постоянную прибора “ β ” по формуле $C_x = \frac{\beta \bar{n}_x}{U}$ найти значение неизвестной емкости.

9. Вместо емкости C_{1x} подключить конденсатор с неизвестной емкостью C_{2x} и пункты 4-5 повторить.

10. Конденсаторы, емкости которых C_{1x} и C_{2x} , соединить последовательно, снять данные согласно пунктов 4-5. По формуле

$C'_{посл.} = \frac{\beta \bar{n}}{U}$ найти общую емкость конденсаторов при последовательном соединении.

11. Конденсаторы, емкость которых C_{1x} и C_{2x} , соединить параллельно, снять данные согласно пунктов 4-5 и найти общую емкость

$C'_{пар} = \frac{\beta n}{U}$

12. По формулам $C_{посл} = \frac{C_{1x} \cdot C_{2x}}{C_{1x} + C_{2x}}$; $C_{пар} = C_{1x} + C_{2x}$ найти об-

щую емкость при – последовательном и параллельном соединении. Сравнить с емкостями полученными в пунктах 10 и 11

13. Сделать выводы.

В выводе дать ответ на следующие вопросы:

- 1) Что представляет собой конденсатор?
- 2) От чего зависит емкость конденсаторов?
- 3) Чему равна общая емкость системы конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2004. – 542 с.
2. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Академия, 2003. – 720 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1988. – Т.2. – 496 с.
4. Калашников С.Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М.: Наука, 1985. – 576 с.

**Курбатова Лариса Михайловна
Проневич Олег Иванович
Хило Петр Анатольевич**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

**Лабораторный практикум
по курсу «Физика»
для студентов всех специальностей
дневной формы обучения
В трех частях
Часть 1**

Подписано в печать 24.12.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,61.

Изд. № 87.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.