

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Физика»

**И. И. Злотников, К. К. Матькунов, О. И. Проневич**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**по курсу «Физика»**

**для студентов энергетического факультета  
и факультета автоматизированных  
и информационных систем**

**Гомель 2010**

УДК 537(075.8)  
ББК 22.33я73  
3-68

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 4 от 30.03.2009 г.)*

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

**Злотников, И. И.**

3-68      Электричество и магнетизм : лаборатор. практикум по курсу «Физика» для студентов энергет. фак. и фак. автоматизир. и информац. систем / И. И. Злотников, К. К. Матькунов, О. И. Проневич. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 45 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.

Содержит краткие теоретические сведения по разделу «Электричество и магнетизм», методику измерений и порядок выполнения лабораторных работ.

Для студентов энергетического факультета и факультета автоматизированных и информационных систем.

УДК 537(075.8)  
ББК 22.33я73

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

**Лабораторная работа № 2**  
**Определение диэлектрической проницаемости твердого полярного диэлектрика**

**Цель работы:** изучить электрические свойства диэлектриков; измерить диэлектрическую проницаемость диэлектрической пластины.

**Приборы и принадлежности:** плоский конденсатор, пластинка диэлектрика, звуковой генератор, частотомер, катушка индуктивности, соединительные провода.

**Теоретическая часть**

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 (рисунок 2.1) с электрическим дипольным моментом:

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

где  $q$  – суммарный положительный заряд всех атомных ядер в молекуле;

$\vec{l}$  – вектор, проведенный из «центра» всех отрицательных зарядов (электронов) в молекуле в «центр» всех положительных зарядов атомных ядер.

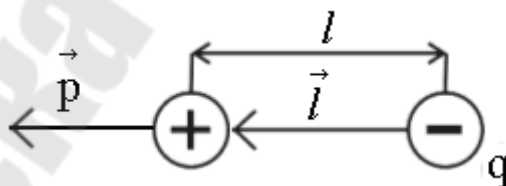


Рисунок 2.1

Диэлектрик называется неполярным, если в отсутствии внешнего электрического поля «центры» положительных и отрицательных зарядов в молекулах этого диэлектрика совпадают ( $\vec{l} = 0$ ) и соответственно дипольные моменты молекул равны нулю ( $\vec{p} = 0$ ) (рисунок 2.2, а). Молекулы, в которых «центры» положительного и отрицательного зарядов совпадают, называются симметричными. К симметричным молекулам относятся  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CCl_4$ .

Полярным диэлектриком называется такой диэлектрик, молекулы (атомы), которого имеют электроны, расположенные несимметрично относительно атомных ядер ( $H_2O$ ,  $HCl$  и др.) (рисунок 2.3, а). В таких молекулах «центры» положительных и отрицательных зарядов не совпадают даже в отсутствие внешнего электрического поля и обладают дипольным моментом.

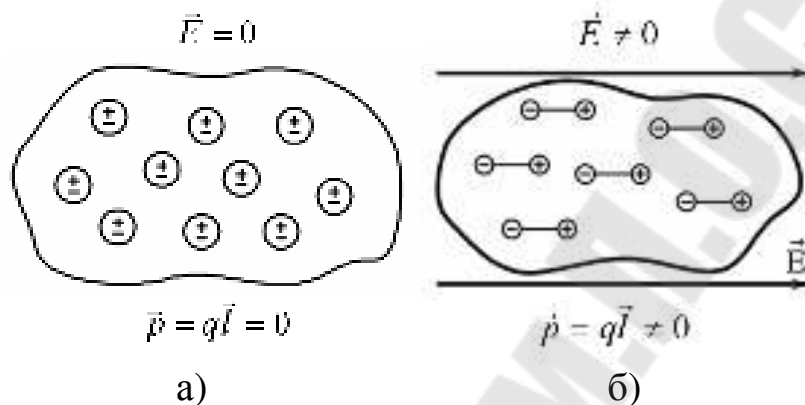


Рисунок 2.2 Неполярная молекула: а) в отсутствие внешнего электрического поля, б) во внешнем электрическом поле.

Однако дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их результирующий дипольный момент некоторого объема равен нулю (рисунок 2.3, а).

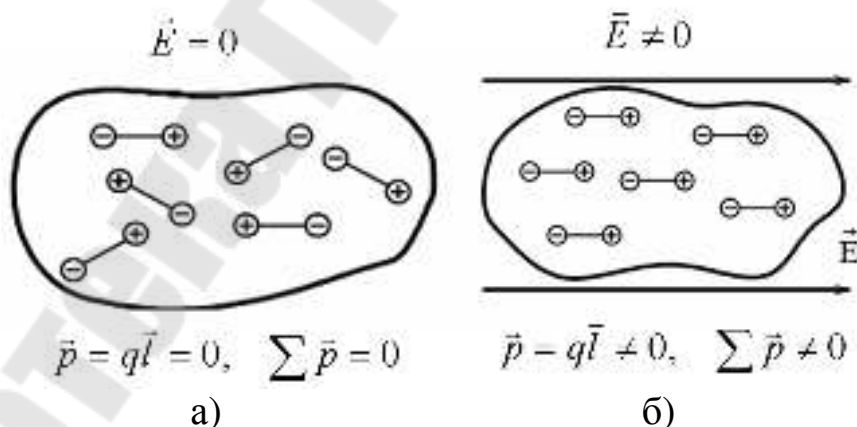


Рисунок 2.3 Полярная молекула: а) в отсутствие внешнего электрического поля; б) во внешнем электрическом поле.

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

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

Ориентационная поляризация наблюдается у полярных диэлектриков. Внешнее электрическое поле стремится ориентировать дипольные моменты полярных молекул (жестких диполей) по направлению вектора напряженности поля (рисунок 2.3, б).

Электронная (деформационная) поляризация осуществляется у неполярных диэлектриков. Под действием внешнего электрического поля у молекул диэлектриков этого типа возникают индуцированные дипольные моменты, направленные вдоль, т.е. по направлению вектора  $\vec{E}$  (рисунок 2.2, б).

Ионная поляризация проходит 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.

Количественной мерой поляризации диэлектрика служит вектор  $\vec{P}$ , называемый поляризованностью 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  $\Delta V$ .

Для большего класса диэлектриков, поляризованность линейно зависит от напряженности электрического поля  $E$ :

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E},$$

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

Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  показывает отношение силы, с которой действует электрическое поле на заряд  $q$  в вакууме  $\vec{F}_0 = q\vec{E}_0$ , к силе с которой действует электрическое поле на тот же заряд  $q$  в среде  $\vec{F} = q\vec{E}$ :

$$\epsilon = \frac{\vec{F}_0}{\vec{F}} = \frac{q\vec{E}_0}{q\vec{E}} = \frac{\vec{E}_0}{\vec{E}}$$

Диэлектрическая проницаемость среды показывает во сколько раз электрическое поле зарядов в вакууме сильнее электрического поля тех же зарядов в диэлектрике. Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  связана с диэлектрической восприимчивостью  $\chi$  соотношением:  $\chi = \epsilon - 1$ .

При помещении диэлектрика во внешнее электростатическое поле он поляризуется, т.е. приобретает отличный от нуля дипольный момент; происходит смещение зарядов: положительные смещаются по полю, отрицательные – против поля (рисунок 2.4).

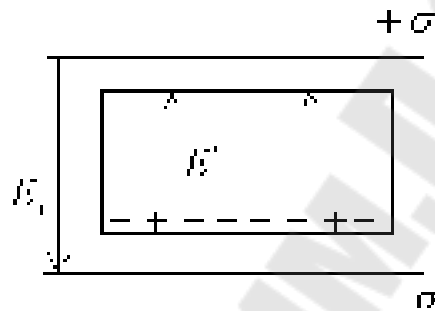


Рисунок 2.4 Поляризация диэлектрика

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  $\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}$ , зависит от свойств среды. 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:  $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$  или  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ .

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

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему (рисунок 2.5).

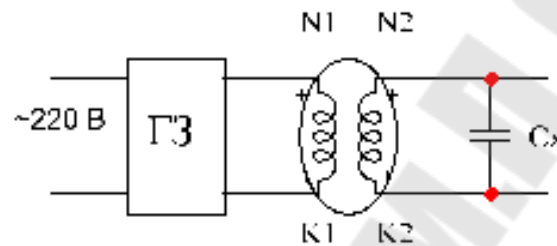


Рисунок 2.5

2. Изменяя частоту генерации, определить частоту, при которой наблюдается максимальное отклонение электронного луча на экране осциллографа. Записать частоту резонанса ( $\nu_\epsilon = \dots \text{кГц}$ ) и результат измерений занести в таблицу 2.1. Настройку на резонанс и измерения сделать 3 раза.

3. Обесточить схему и вставить исследуемую пластину в конденсатор. Включить установку и повторить пункт 2. Записать частоту резонанса ( $\nu_\delta = \dots \text{кГц}$ ).

4. Отключить один провод идущий от катушки взаимной индуктивности к конденсатору и повторить пункт 2, Записать частоту резонанса ( $\nu_n = \dots \text{кГц}$ ).

5. Вычислить диэлектрическую проницаемость:

$$\epsilon = \frac{\nu_\epsilon^2 (\nu_n^2 - \nu_\delta^2)}{\nu_\delta^2 (\nu_n^2 - \nu_\epsilon^2)}.$$

6. Определить абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений по формуле (приблизленно):

$$\Delta\epsilon = \epsilon \left( 2 \frac{\Delta\nu_\epsilon}{\nu_\epsilon} + 2 \frac{\Delta\nu_\delta}{\nu_\delta} + 2 \frac{\Delta\nu_n}{\nu_n} \right).$$

$$\Delta v = \sqrt{\frac{\sum (v_1 - v_{cp})^2}{n(n-1)} \cdot t^2(\alpha, n) + \frac{t(\alpha, \infty)}{3^2} \cdot \frac{C_{\min}^2}{2}},$$

где  $C_{\min}$  - цена деления частотомера.

7. Относительная погрешность:

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

Таблица 2.1

| № | $v_{\varepsilon}$<br>кГц | $v_{\partial}$<br>кГц | $v_n$<br>кГц | $\Delta v_{\varepsilon}$<br>кГц | $\Delta v_{\partial}$<br>кГц | $\Delta v_n$<br>кГц | $\varepsilon$ | $\Delta \varepsilon$ |
|---|--------------------------|-----------------------|--------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| 1 |                          |                       |              |                                 |                              |                     |               |                      |
| 2 |                          |                       |              |                                 |                              |                     |               |                      |
| 3 |                          |                       |              |                                 |                              |                     |               |                      |
|   |                          |                       |              |                                 |                              |                     |               |                      |

8. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Типы диэлектриков. Поляризация диэлектриков.
2. Поляризованность. Напряженность электрического поля в диэлектриках.
3. Вектор электрического смещения. Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике. Условия на границе раздела диэлектриков.
4. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики.

### Литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики, М., Наука, 1973 г.
2. Яворский Б. М. Курс физики, Высшая школа, 1966 г.
3. Трофимова Т. И. Курс физики, М., Высшая школа, 1997 г.



**Лабораторная работа № 3**  
**Изучение электростатического поля методом**  
**электрических 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 питания, реостат, вольтметр, ванна с водой, гальванометр, металлический зонд, электроды различной формы.

**Теоретическая часть**

Всякое заряженное тело создают вокруг себя силовое поле, которое называется электрическим полем. Количественной характеристикой силового действия этого поля является напряженность электрического 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

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$$

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 (рисунки 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.

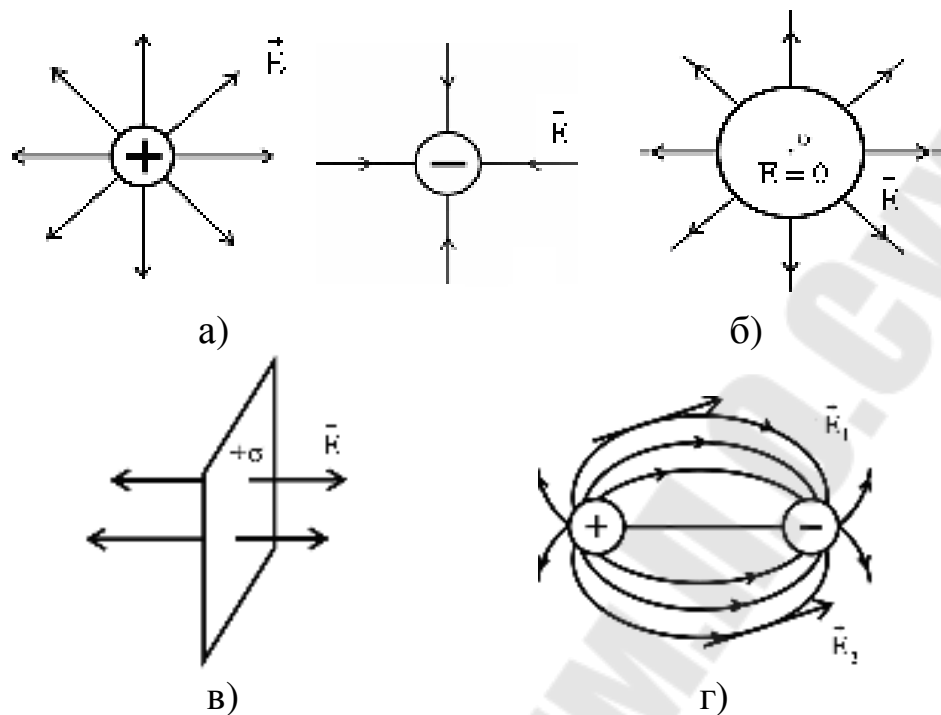


Рисунок 3.1

- 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 напряженность  $E$ , равна геометрической сумме напряженностей поля каждого заряда  $E_i$ :

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

Это соотношение выражает принцип суперпозиции электрических полей.

Электростатическое поле является потенциальным, т.к. работа силы по переносу заряда по любому замкнутому контуру равна нулю:

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

Работа, совершаемая силами электростатического поля при малом перемещении  $dr$  точечного заряда  $q_0$  в этом поле,

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_2}.$$

С другой стороны, как следует из механики, эта работа равна убыли потенциальной энергии  $W_n$

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2}$$

Следовательно, потенциальная энергия точечного заряда  $q_0$  в поле заряда  $q$ , 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 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  $A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$ . 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  $d\vec{r}$  равна  $dA = qEdr$

С другой стороны  $dA = -qd\varphi$ , тогда  $E = -\frac{d\varphi}{dr}$  или в векторной форме  $\vec{E} = -\left(\frac{d\varphi}{dx}\vec{i} + \frac{d\varphi}{dy}\vec{j} + \frac{d\varphi}{dz}\vec{k}\right)$ . Эта формула выражает связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля.

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.

Потоком вектора напряженности  $\Phi_E$  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. нормали, направленной наружу области, охватываемой поверхностью.

Найдем поток вектора напряженности сквозь сферическую поверхность радиуса  $r$ , охватывающую точечный заряд  $q$ , находящийся в ее центре (рисунок 3.2):

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = E_n S = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

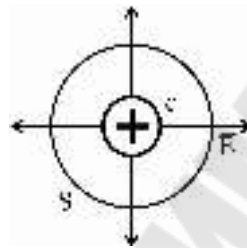


Рисунок 3.2.

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  $\epsilon_0$ .

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i \text{ – теорема Остроградского-Гаусса.}$$

Применим теорему Остроградского-Гаусса к расчету поля заряда  $q$ , равномерно распределенного по поверхности сферы радиуса  $R$  с поверхностной плотностью  $\sigma$ .

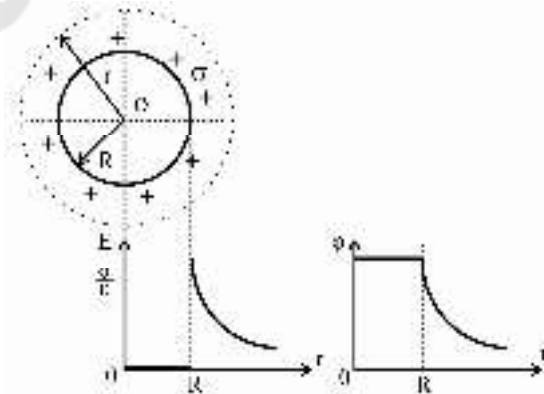


Рисунок 3.3.

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

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

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

Потенциал поля  $\phi$  заряженной сферы найдем из формулы связи между потенциалом и напряженностью поля  $E = -\frac{d\phi}{dr}$ .

$$\phi = -\int_{\infty}^r E dr = -\int_{\infty}^r \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

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

#### 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 электрического тока в проводящей среде между теми же проводниками. 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. Electroды нагружаются 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. Electroды подключают к крайним точкам потенциометра “АС”, который питается от источника на 10÷15В (Рисунок 3.4) Разность потенциалов измеряется вольтметром “V”, внутреннее сопротивление которого должно быть больше сопротивления потенциометра и участка электростатического поля.

тролита между электродами. Ток в цепи “зонд-движок” регистрируется чувствительным гальванометром. Координаты точек эквипотенциальных поверхностей определяют по координатной сетке, нанесенной на дно ванны.

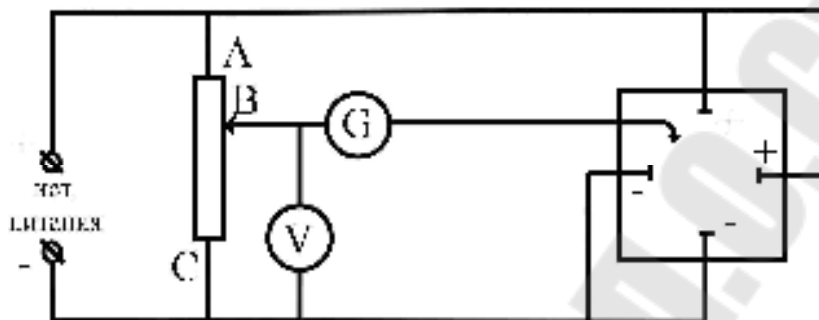


Рисунок 3.4.

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 (микроамперметре). Перемещая зонд вверх – вниз и влево – вправо по дну ванны можно найти множество точек с одинаковым потенциалом, совокупность которых образует эквипотенциальную поверхность.

### Порядок выполнения работы.

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рисунок 3.5).

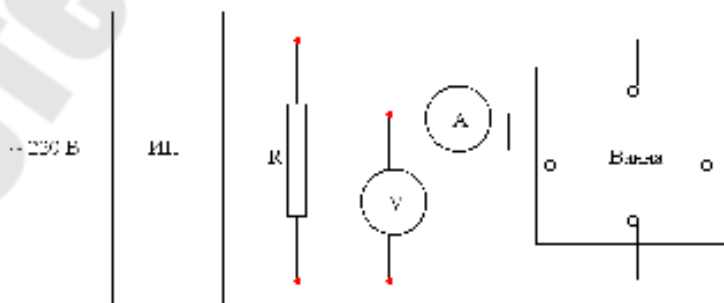


Рисунок 3.5

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  $\varphi_1$  (задается преподавателем).

4. Перемещая зонд в ванне определить координаты точек равного потенциала, при которых ток через гальванометр отсутствует (точек не менее 7-8).

5. Действия, аналогичные указанным в пунктах 3 и 4 производят также еще для двух значений потенциала  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ .

Все значения заносят в таблицу 3.1

Таблица 3.1

| Номер точки           | 1     |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       | 7     |       |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | $x_1$ | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ | $x_3$ | $y_3$ | $x_4$ | $y_4$ | $x_5$ | $y_5$ | $x_6$ | $y_6$ | $x_7$ | $y_7$ |
| $\varphi_1 = \dots B$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\varphi_2 = \dots B$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\varphi_3 = \dots B$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

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 ( $90^\circ$ ).

в) в разных точках поля между электродами определить значения напряженности  $E$  по формуле  $E = \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} \right|$ , где  $\Delta y$  - расстояние изме-

ряемое по кратчайшей прямой с учетом масштаба между теми эквипотенциальными поверхностями, между которыми берется разность потенциалов ( $E = -\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} i + \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} j\right)$ , но т.к. вид функции  $\varphi(r)$  – неиз-

вестны, то  $E = \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} \right|$ ).

7. Сделать выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.
2. Электрическое поле. Напряженность поля. Принцип суперпозиций. Поле диполя равномерно заряженного кольца и стержня.
3. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для электрического поля в вакууме.
4. Электрическое поле равномерно заряженной плоскости. Двух равномерно заряженных плоскостей.
5. Электрическое поле равномерно заряженной сферы и бесконечного цилиндра.
6. Потенциал электрического поля. Связь напряженности с потенциалом. Работа в электрическом поле.
7. Вычисление потенциала поля, созданного точечным зарядом, равномерно заряженной плоскости, заряженным кольцом.
8. Вычисление разности потенциалов между двумя параллельными бесконечными заряженными плоскостями, между обкладками сферического и цилиндрического конденсаторов.

### **Литература**

1. Савельев И. В. Курс общей физики, т. 2, М., Наука, 1982 г.
2. Трофимова Т. И. Курс физики, М., Высшая школа, 1997 г.



## Лабораторная работа № 4

### Изучение работы источника постоянного тока

**Цель работы:** Изучение зависимости полной мощности, полезной мощности тока и КПД источника тока от нагрузки.

**Приборы и принадлежности:** Источник тока ( $G_4$ ), миллиамперметр ( $mA_2$ ), вольтметр ( $U_2$ ), магазин сопротивлений ( $R \times 10, R \times 100$ ), переключатели ( $S_2, S_3$ ).

### Теоретическая часть

Электрическим током называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. Для возникновения и существования электрического тока в среде необходимо:

1. Наличие свободных носителей тока – заряженных частиц;
2. Наличие электрического поля.

За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов. Количественной мерой электрического тока 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 направ-

ление которого не изменяется с течением времени  $I = \frac{q}{t}$ . Единица силы тока – ампер (А).

Физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока называется плотностью тока  $j = \frac{I}{S} = \frac{q}{S \cdot t}$ .

Плотность тока – вектор, ориентированный по направлению тока, т.е. направление вектора  $\vec{j}$  совпадает с направлением движения положительных зарядов. Тогда сила тока – это поток вектора плотности тока сквозь произвольную поверхность  $S$ :  $I = \int_S j dS$ .

Если концентрация носителей тока равна  $n$ , каждый носитель имеет заряд  $e$  и движется со средней скоростью упорядоченного движения  $v$ , то за время  $dt$  через поперечное сечение  $S$  перенесется заряд  $dq = ne v S dt$ , а плотность тока  $\vec{j} = ne v \vec{v}$ .

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 (рисунок 4.1)

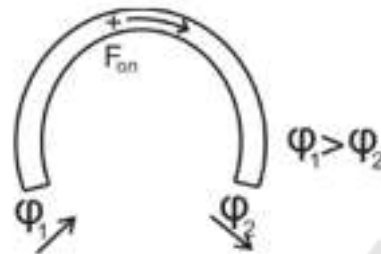


Рисунок 4.1

Перемещение этих зарядов осуществляется за счет сил неэлектрического происхождения – 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  $A_{cm}$  при перемещении единичного положительного заряда  $q_0$ , называется электродвижущей силой (э.д.с.)  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q_0}.$$

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 еди-

ничного положительного заряда на участке 1-2, называется напряжением  $U_{12} = \frac{A_{эл} + A_{см}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$ .

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.

Если учесть, что  $I = jds$ ;  $U = Edl$  и  $R = \rho \frac{dl}{dS}$ , то  $j dS = \frac{Edl}{\rho dl}$  и закон Ома можно представить в дифференциальной форме:  $j = \frac{E}{\rho} = \sigma E$ , где  $\rho$  – 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 можно записать вектором в виде:  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ .

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 (замкнутой) цепи  $I = \frac{\varepsilon}{R_{общ}} = \frac{\varepsilon}{R + r}$ , где  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока.

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

$$A = qU = IUt.$$

$$\text{Используя закон Ома } I = \frac{U}{R} \text{ получим } A = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t.$$

Мощность тока  $P_{пол} = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$  – 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:

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

Важные свойства электрических цепей:

1. Полезная мощность максимальна при выполнении «условия согласования»  $R = r$ ,  $(P_{\text{полн}})_{\text{max}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$ ;
2. Полная мощность максимальна при  $R = 0$ , уменьшается вдвое при  $R = r$ , стремится к нулю при  $R \rightarrow \infty$   $P_{\text{max}} = \frac{\varepsilon^2}{r}$ ;
3. КПД равен нулю при  $R = 0$   
 $\eta = 0.5$  при  $R = r$   
 $\eta \rightarrow 1$  при  $R \rightarrow \infty$ .

Графики зависимости  $I(R)$ ,  $P_{\text{полн}}(R)$ ,  $\eta(R)$  представлены на рисунке 4.2.

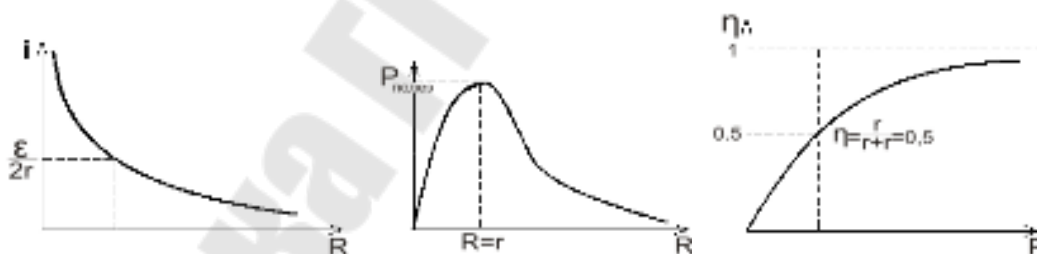


Рисунок 4.2

Если ток проходит по неподвижному металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание и, по закону сохранения 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  $dV = dids$  – элементарный объем проводника;

$w = \frac{dQ}{dVdt}$  – количество теплоты, выделившееся за единицу времени в единице объема, называется удельной тепловой мощностью тока;

$w = \rho j^2 = \sigma E^2$  – дифференциальная форма закона Джоуля – Ленца  $j = \sigma E$ ,  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему (рисунок 4.3), переключатели  $S_2$  и  $S_3$  разомкнуты.

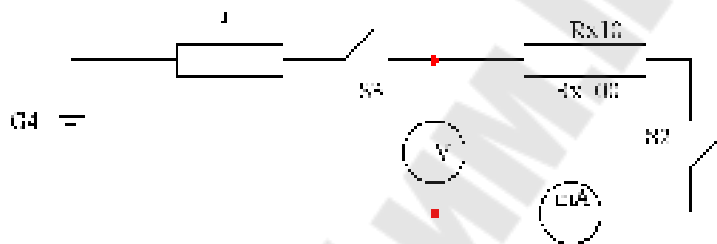


Рисунок 4.3

2. Включить цепь переключателем  $S_3$  и зафиксировать показания вольтметра. Показания вольтметра можно считать равным ЭДС источника  $\varepsilon$ .

3. Подключить магазин сопротивлений  $R \times 10$ . Замкнуть электрическую цепь переключателем  $S_2$ .

4. Изменяя сопротивление  $R$  от 0 до 100 Ом с интервалом 10 Ом, занести показания вольтметра  $U_2$  и миллиамперметра  $mA_2$  в таблицу 1.

5. Подключить магазин сопротивлений  $R \times 100$ . Изменяя сопротивление  $R$  от 100 до 1000 Ом с интервалом 100 Ом, занести показания вольтметра  $U_2$  и миллиамперметра  $mA_2$  в таблицу 4.1.

6. По формуле  $P_{II} = I^2 R$  вычислить значение полезной мощности.

7. По формуле  $P = \varepsilon I$  вычислить значение полной мощности.

8. По формуле  $\eta = \frac{U}{\varepsilon}$  определить КПД источника тока.

9. Построить графики  $P_{II} = f(R)$ ,  $\eta = f(R)$ ,  $I = f(R)$ .

10. Найти из графиков  $P_{II} = f(R)$  и  $I = f(R)$  значения внутреннего сопротивления источника  $r$  и ток короткого замыкания  $I_{KЗ}$ .

11. Сделать вывод.

Таблица 4.1

|     | $R$ , Ом | $U$ , В         | $I$ , мА | $R_{\text{П}}$ , Вт | $P$ , Вт | $\eta$ |
|-----|----------|-----------------|----------|---------------------|----------|--------|
| 1   | $\infty$ | $\varepsilon =$ |          |                     |          |        |
| 2   |          |                 |          |                     |          |        |
| ... |          |                 |          |                     |          |        |
| $N$ |          |                 |          |                     |          |        |

### Контрольные вопросы

1. В чем состоят условия существования тока в проводнике.
2. Что такое сторонние силы, работа сторонних сил.
3. Что называется падением напряжения на участке цепи.
4. Какие величины характеризуют режим работы источника тока.
5. Как зависит ток в цепи, полезная мощность и КПД источника от внешней нагрузки.
6. Что понимают под ЭДС источника тока, от чего она зависит.

### Литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики, М., Наука, 1982 г.
2. Калашников С. Г. Электричество, Наука, 1970 г.
3. Трофимова Т. И. Курс физики, М., Высшая школа, 1997 г.

**Лабораторная работа № 5**  
**Изучение законов цепи постоянного тока**  
**с последовательным и параллельным соединением**

**Цель работы:** Изучить законы электрического тока в цепях с последовательным и параллельным соединением сопротивлений.

**Приборы и принадлежности:** Источник постоянного тока ( $G_4$ ), амперметр ( $A_2$ ), вольтметр ( $U_2$ ), цифровой переключатель ( $S_2$ ), исследуемые резисторы ( $R_1, R_2, R_3$ ).

**Теоретическая часть**

Согласно закону Ома сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику пропорциональна напряжению  $U$  на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению проводника  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Величина обратная сопротивлению  $\frac{1}{R} = G$  – называется проводимостью проводника. Уравнение  $I = \frac{U}{R}$  называется законом Ома для участка цепи, не содержащего источника тока (э.д.с.).

При последовательном соединении проводников их сопротивления складываются:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При параллельном соединении суммируются обратные значения сопротивлений:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Для участка содержащего источник тока (э.д.с.) закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2 + \varepsilon_{12}}{R_{\text{общ}}}.$$

Если цепь замкнута, т.е.  $\Phi_1 = \Phi_2$ , то получим закон Ома для замкнутой цепи  $I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{общ}}} = \frac{\varepsilon}{R + r}$ , где  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока.

Рассмотрим однородный проводник, к которому приложено напряжение  $U$ . За время  $t$  через поперечное сечение проводника пе-

переносится заряд  $q = It$ . Так как ток представляет собой перемещение заряда  $q$  под действием электрического поля, то работа электрического тока

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

$$A = qU = IUt.$$

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

Если ток проходит по неподвижному металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание, т.е.

$Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$  Полученное выражение называется закон Джоуля – Ленца.

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:

$$\sum_i I_i = 0.$$

Узлом называется любая точка цепи, в которой сходятся не менее трех проводников.

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:

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

В качестве примера применения правил Кирхгофа рассмотрим схему (рисунок 5.1)

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;



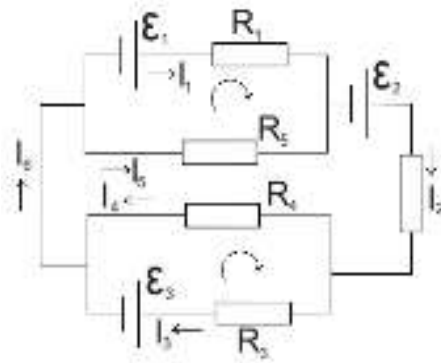


Рисунок 5.1

Составим уравнения для электрической схемы изображенной на рисунке 5.1.

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.

### Порядок выполнения работы

1. Измерение неизвестных сопротивлений.

1.1. Собрать рабочую схему (рисунок 5.2).

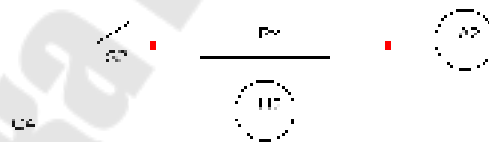


Рисунок 5.2

1.2. Произвести замеры напряжения и тока и определить величину сопротивления по уточненной формуле  $R_{X_1} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_U}}$ , где внут-

ренне сопротивление вольтметра  $R_U = 700 \text{ Ом}$ .

1.3. Аналогично определить сопротивление другого резистора  $R_{X_2}$ , сделать выводы.

2. Изучение законов электрической цепи с последовательным соединением сопротивлений.

2.1. Собрать рабочую схему (рисунок 5.3), сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  задаются преподавателем.

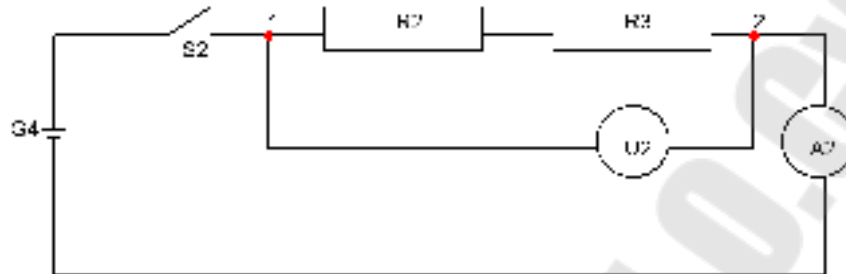


Рисунок 5.3

2.2. Включить переключатель  $S_2$  и снять показания приборов. Данные занести в таблицу. Произвести расчет сопротивления участка 1-2. Полученный результат проверить по формуле для последовательного соединения сопротивлений  $R = R_2 + R_3$ . Сделать вывод.

3. Изучение законов электрической цепи с параллельным соединением сопротивлений.

3.1. Собрать рабочую схему с сопротивлениями  $R_2$  и  $R_3$  (рисунок 5.4).

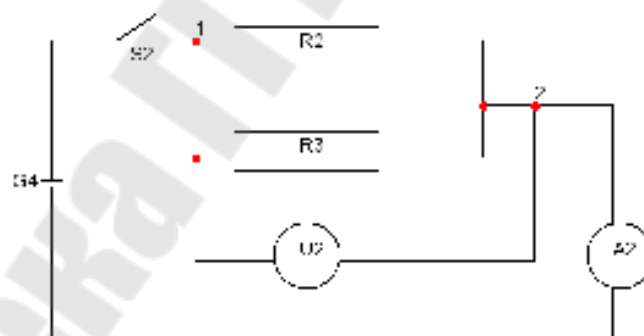


Рисунок 5.4

3.2. Включить переключатель  $S_2$  и снять показания приборов. Данные занести в таблицу. Произвести расчет сопротивления участка 1-2. Полученный результат проверить формулой для параллельного

соединения сопротивлений  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ . Сделать вывод.

### Контрольные вопросы

1. Сформулировать законы Ома и Джоуля – Ленца.
2. Общее сопротивление цепи при последовательном и параллельном соединении.

3. Напряжения и токи в цепи с последовательным и параллельным соединением сопротивлений.

4. Погрешности при измерении сопротивлений методом вольтметра и амперметра.

#### **Литература**

1. Савельев И. В. Курс общей физики, М., Наука, 1982 г.
2. Трофимова Т. И. Курс физики, М., Высшая школа, 1997 г.

## Лабораторная работа № 6

### Изучение основных свойств полупроводниковых диодов

**Цель работы:** Изучить принцип работы полупроводниковых приборов, снять их вольт – амперные характеристики и определить основные параметры.

**Приборы и принадлежности:** Источники тока ( $G_3, G_4, G_8$ ), источник постоянного тока, амперметр ( $mA$ ), амперметр ( $A_2$ ), вольтметр, потенциометры ( $R$ ), переключатели ( $S_2, S_3$ ), исследуемые диоды, цифровые вольтметр и амперметр.

### Теоретическая часть

#### Понятие о зонной теории твёрдых тел

Зонная теория рассматривает твёрдое кристаллическое тело как строго периодическую структуру, в которой неподвижные положительные ионы создают электрическое поле, а электроны движутся в этом поле. Точное решение для системы множества электронов невозможно, поэтому эта задача решается приближённо, путём сведения к задаче об одном электроне, движущемся во внешнем электрическом поле.

Рассмотрим мысленно процесс образования твёрдого тела из изолированных атомов. Пока атомы находятся друг от друга на макроскопических расстояниях, они имеют совпадающие схемы энергетических уровней. Уровень с наименьшим значением энергии  $E_1$ , называется основным или невозбуждённым. Все остальные уровни называются возбуждёнными (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 Энергетические уровни валентного электрона системы слабо взаимодействующих атомов

По мере сближения атомов взаимодействие между атомами приводит к тому, что энергетические уровни атомов смещаются, расщепляются и образуют так называемые энергетические зоны. Так как число атомов в кристалле велико, поэтому расстояние между соседними энергетическими уровнями в зоне составляет примерно  $10^{-22}$  эВ, и зоны можно считать практически непрерывными (рисунок 6.2).

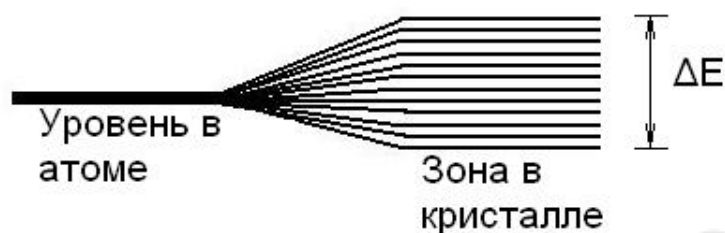


Рисунок 6.2

При этом заметно расщепляются и расширяются уровни высших, валентных электронов, наиболее слабо связанных с ядром и имеющих наибольшую энергию, а также более высокие уровни, которые вообще электронами не заняты. Разрешённые энергетические зоны 1 отделены друг от друга зонами 2 запрещённых значений энергий электронов (рисунок 6.3).

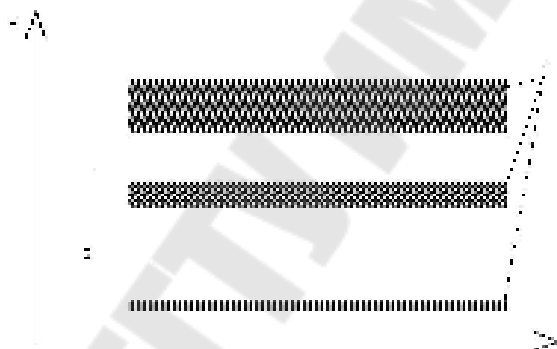


Рисунок 6.3

В запрещённых зонах электроны находиться не могут. Ширина разрешённых и запрещённых зон не зависит от размера кристалла. Ширина разрешённых зон возрастает с ростом энергии электрона в атоме, а ширина запрещённых зон при этом уменьшается.

### **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  $T = 0$  К, называется зоной проводимости. Самая верхняя зона, полностью заполненная электронами при  $T = 0$  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 (рисунок 6.4, а).

Твёрдое тело является проводником электрического тока и в том случае, когда валентная зона перекрывается свободной зоной. Это имеет место для щелочноземельных элементов, образующих II группу таблицы Менделеева (*Be, Mg, Ca, Zn*). В этом случае образуется так называемая «гибридная зона», которая заполняется валентными электронами частично (рисунок 6.4, б)

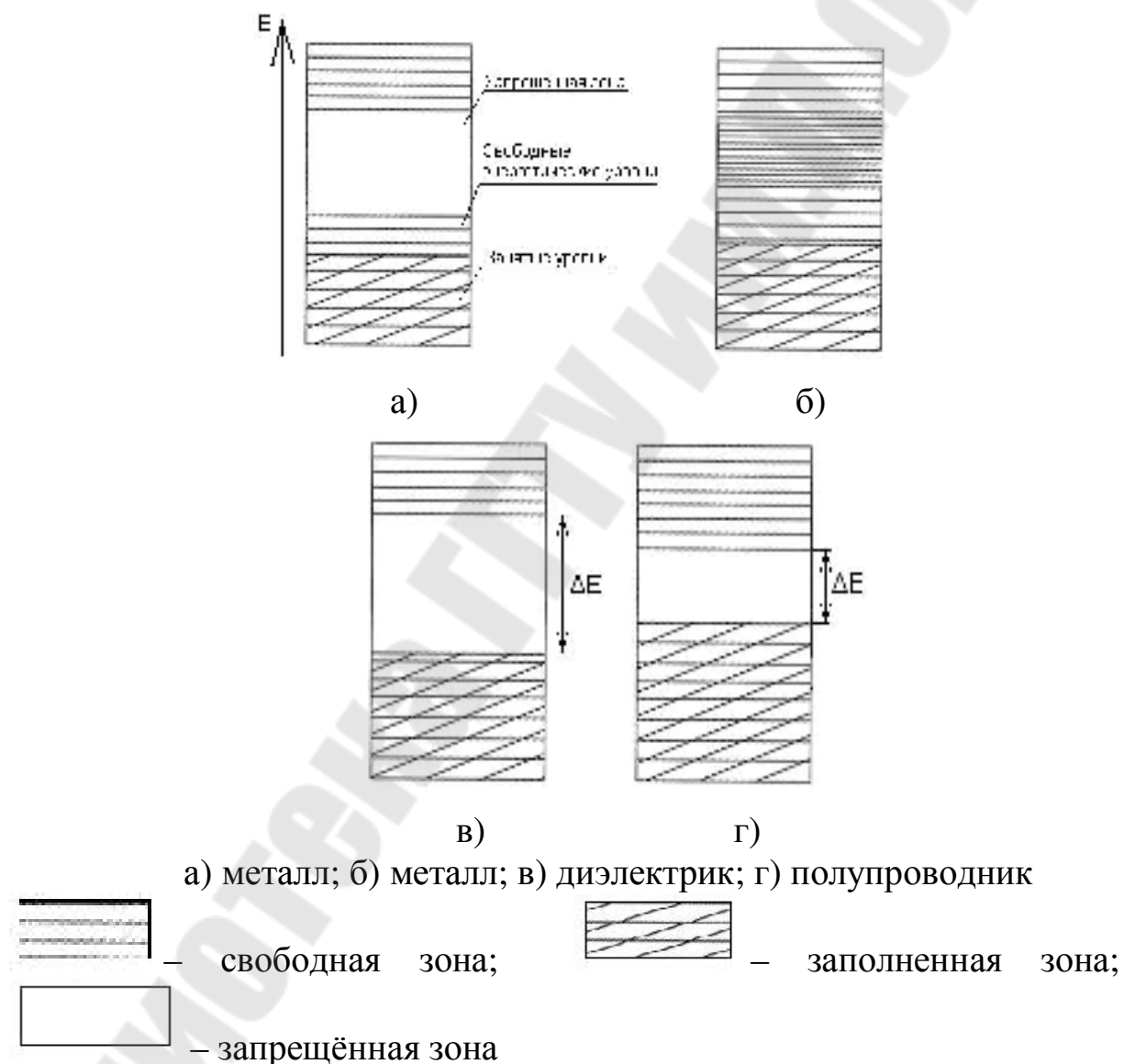


Рисунок 6.4

Твёрдые тела, у которых энергетические зоны не перекрываются, являются диэлектриками или полупроводниками, в зависимости от ширины запрещенной зоны  $\Delta E$ .

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 (рисунок 6.4, 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 и кристалл является полупроводником.

Собственная и примесная проводимость полупроводников

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

Тогда удельная проводимость

$$\sigma = env$$

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

где  $\Delta E$  – энергия активации,  $\sigma_0$  – постоянная, характерная для данного проводника.

Примесная проводимость полупроводников

В примесных полупроводниках проводимость обусловлена за счёт введения примесей.

Введём в кристалл четырехвалентного германия  $Ge^{IV}$  примесь пятивалентного фосфора  $P^V$ . 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 (рисунок 6.5, а)

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

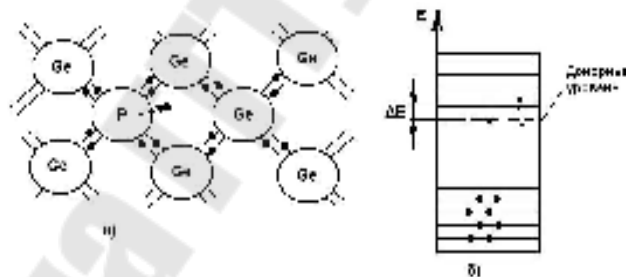


Рисунок 6.5

фосфора (рисунок 6.5, б). Такая примесь называется донором, а уровень – донорным уровнем. Донорный уровень находится на малом расстоянии от дна зоны проводимости. Это расстояние называется энергией активации  $\Delta E$  ( $\Delta E \approx 0.015$  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



Введём в кристалл четырёхвалентного германия  $Ge^{IV}$  примесь трёхвалентного бора  $B^{III}$ . Для образования четырёх ковалентных связей у атома бора не хватает одного электрона, т.е. одна из связей остаётся неупакованной и четвёртый электрон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества, где образуется дырка (рисунок 6.6, а). Последовательное заполнение образующихся дырок электронами эквивалентно движению дырок в полупроводнике.

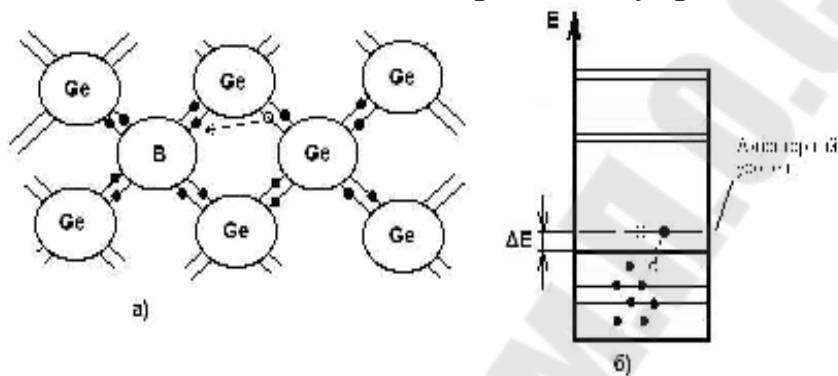


Рисунок 6.6

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 (рисунок 6.6, 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 или проводимость  $p$ -типа.

### 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 (рисунок 6.7). В  $n$ -полупроводнике, из-за ухода электронов, вблизи границы остаётся нескомпенсированный положительный заряд неподвижных ионизированных донорных атомов.

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  $p$ -области. Если концентрация доноров и акцепторов в полупроводниках  $n$ - и  $p$ -типа одинаковы, то толщина слоёв  $d_1$  и  $d_2$  равны.

В области  $p$ - $n$ -перехода энергетические зоны искривляются, в результате чего возникают потенциальные барьеры, как для электронов, 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.

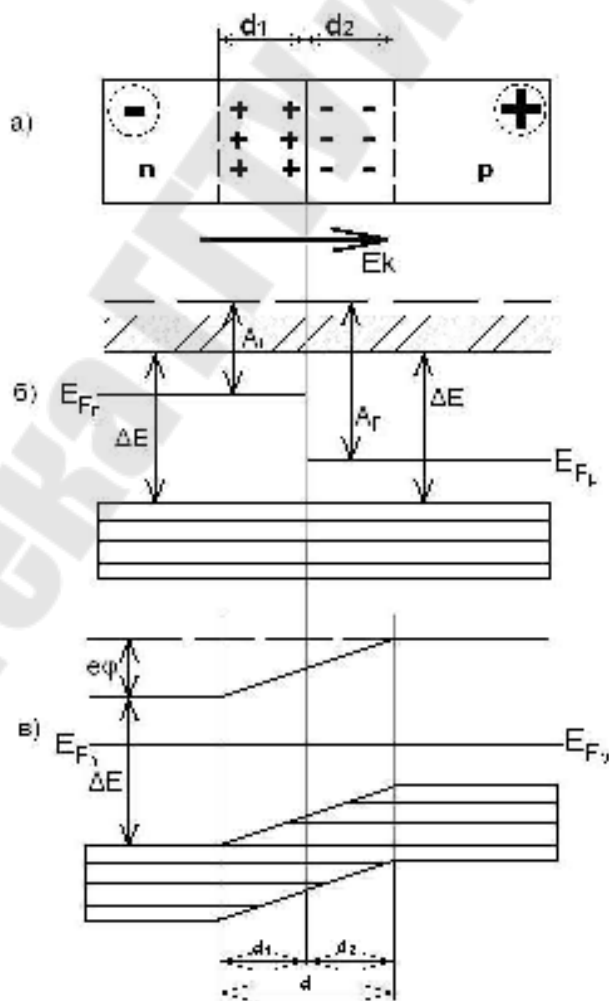


Рисунок 6.7

Сопротивление запирающего слоя можно уменьшить с помощью внешнего электрического поля.

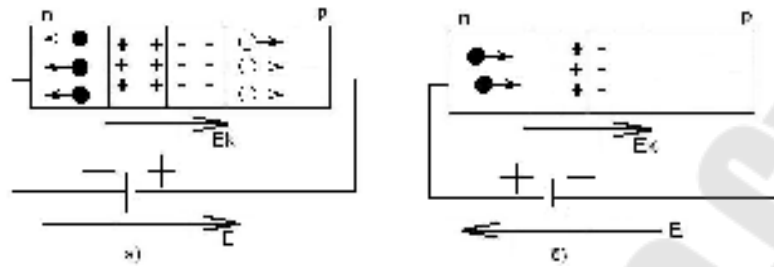


Рисунок 6.8

Если приложенное к  $p-n$ -переходу внешнее электрическое поле направлено от  $n$ -полупроводника к  $p$ -полупроводнику (рисунок 6.8, 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  $E$  направленное против поля барьера, то в результате ширина барьера и его сопротивление уменьшается (рисунок 6.8, б). Следовательно, в этом направлении электрический ток проходит через  $p-n$ -переход и называется прямым.

Таким образом, контакт полупроводников с разными типами проводимости образует  $p-n$ -переход обладающий свойством односторонней проводимости электрического тока.

Односторонняя проводимость  $p-n$ -перехода используется для выпрямления и преобразования переменного электрического тока. Полупроводниковое устройство, содержащее один  $p-n$ -переход, называется полупроводниковым диодом. Вольт-амперная характеристика диода приведена на рисунке 6.9.

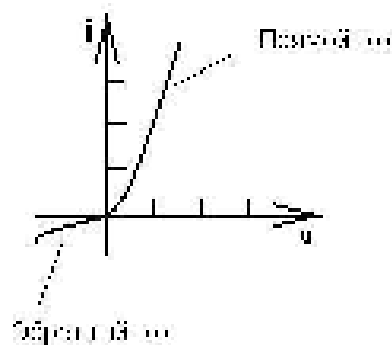


Рисунок 6.9

### Порядок выполнения работы

1. Исследование полупроводникового диода.

1.1. Собрать рабочую схему (рисунок 6.10).

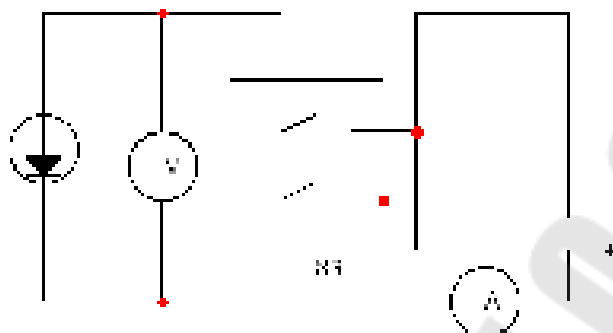


Рисунок 6.10

1.2. Снять показания прямого включения (ручка тумблера  $S_3$  вверх). Результат занести в таблицу 6.1.

1.3. Снять показания обратного включения (ручка тумблера  $S_3$  вниз). Изменяя источником питания величину напряжения, снять показания вольтметра и амперметра. Результаты занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

|                    |                |   |   |   |   |   |     |    |
|--------------------|----------------|---|---|---|---|---|-----|----|
| Прямое включение   |                | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ... | 20 |
|                    | $U, \text{В}$  |   |   |   |   |   |     |    |
|                    | $I, \text{mA}$ |   |   |   |   |   |     |    |
| Обратное включение |                |   |   |   |   |   |     |    |
|                    | $U, \text{В}$  |   |   |   |   |   |     |    |
|                    | $I, \text{mA}$ |   |   |   |   |   |     |    |

1.4. Построить вольт – амперную характеристику полупроводникового диода.

1.5. Определить из таблицы 6.2 коэффициент выпрямления тока  $\alpha = \frac{I_{np}}{I_{обр}}$ , при  $U_{np} = U_{обр}$ .

$$\alpha = \frac{I_{np}}{I_{обр}}, \text{ при } U_{np} = U_{обр}.$$

Таблица 6.2

|                                   | $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_4$ | $U_5$ | $U_6$ | $U_7$ | $U_8$ | $U_9$ | ... | $U_N$ |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| $I_{np}, \text{mA}$               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |       |
| $I_{обр}, \text{mA}$              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |       |
| $\alpha = \frac{I_{np}}{I_{обр}}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |       |

1.6. Построить график зависимости  $\alpha = f(U)$ .

1.7. Сделать выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Полупроводники и их особенности.
2. Механизм электронной и дырочной проводимости.
3. Принцип работы полупроводникового диода.
4. Что такое потенциальный барьер и почему он возникает.

### **Литература**

1. Савельев И. В. Курс общей физики, М., Наука, 1982 г.
2. Калашников С. Г. Электричество, Наука, 1970 г.
3. Трофимова Т. И. Курс физики, М., Высшая школа, 1997 г.

**Лабораторная работа № 8**  
**Определение емкости конденсатора с помощью**  
**электронного вольтметра**

**Цель работы:** Определить емкости конденсаторов и проверить законы последовательного и параллельного соединения конденсаторов.

**Приборы и принадлежности:** Источник питания ( $G_2$ ), электронный вольтметр, потенциометр ( $R_{14}$ ), эталонный конденсатор ( $C_{эм}$ ), исследуемые конденсаторы ( $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$ ), переключатели ( $S_1$ ,  $S_3$ ), резистор ( $R_6$ ).

**Теоретическая часть**

Проводники – вещества обладающие способностью проводить электрический ток благодаря наличию в них свободных зарядов.

В проводниках первого рода, к которым относятся металлы, носителями заряда являются электроны. Протекание электрического тока по проводникам первого рода не сопровождается химическими превращениями. В проводниках второго рода (растворы солей, кислот) носителями заряда являются положительные и отрицательные ионы, а протекание электрического тока в них ведет к химическим изменениям.

Если металлический проводник внести во внешнее электростатическое поле (рисунок 8.1), 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. Напряжённость электрического поля непосредственно у поверхности проводника направлена по нормали к поверхности, так как в противном случае касательная составляющая поля вызвала бы перераспределение зарядов на поверхности проводника.

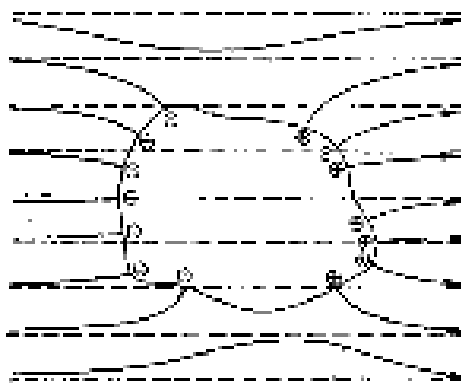


Рисунок 8.1

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

Для проводника в электростатическом поле выполняются следующие условия:

- 1) Всюду внутри проводника напряженность поля  $\vec{E} = 0$
- 2) Весь объем проводника и его поверхность эквипотенциальны, т.е. потенциал во всех точках внутри и на поверхности проводника постоянен  $\varphi = const$
- 3) Линии напряженности электрического поля перпендикулярны к поверхности проводника.
- 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 однородной, изотропной диэлектрической среде, зависит только от формы поверхности проводника.

Потенциал уединенного проводника прямо пропорционален его заряду, поэтому величина  $C = \frac{q}{\varphi}$  не зависит от сообщенного проводнику заряда и является постоянной для данного проводника. Величина  $C$  называется емкостью проводника. Единица емкости – фарад (Ф)

Потенциал уединенного проводящего шара  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}$ , поэтому емкость шара равна:  $C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R$ .

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 абсо-

лутному 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 (рисунок 8.2).

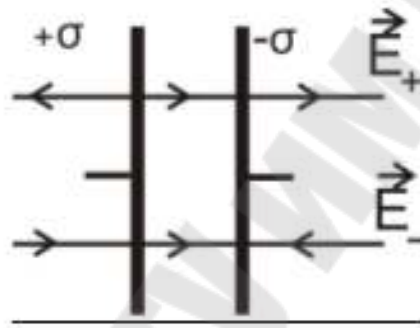


Рисунок 8.2

Напряженность электрического поля внутри конденсатора равна  $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$ . Разность потенциалов между обкладками конденсатора

$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} dx = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} d$ ; где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками. Тогда,

заменив  $q = \sigma S$  получим  $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\sigma S \epsilon \epsilon_0}{\sigma d} = \frac{S \epsilon \epsilon_0}{d}$ .

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

Напряженность поля в конденсаторе направлена радиально и равна  $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$ .

Разность потенциалов между обкладками конденсатора:



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

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

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}, \text{ где } \tau = \frac{dq}{dl} \text{ — линейная плотность зарядов.}$$

Разность потенциалов между обкладками конденсатора:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Емкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\tau l 2\pi\epsilon_0\epsilon}{\tau \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

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 разряд через слой диэлектрика)

Соединение конденсаторов.

1) Параллельное соединение конденсаторов (рисунок 8.3).

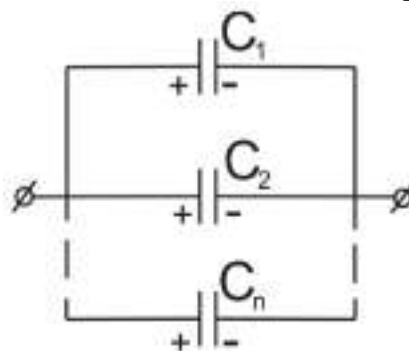


Рисунок 8.3

Все конденсаторы такой батареи имеют одинаковую разность потенциалов на обкладках  $\Delta\varphi$ .

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

$$q_1 = c_1 \Delta\varphi$$

$$q_2 = c_2 \Delta\varphi$$

...

$$q_n = c_n \Delta\varphi$$

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.

2) Последовательное соединение конденсаторов (рисунок 8.4)

При последовательном соединении конденсаторов в батарею заряды всех конденсаторов одинаковы, а разность потенциалов

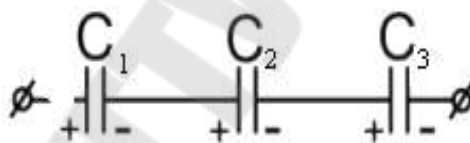


Рисунок 8.4

батареи равна сумме разностей потенциалов на каждом из конденсаторов  $\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \sum_{i=1}^n \frac{q}{C_i} = q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ .

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

Таким образом, при последовательном соединении конденсаторов результирующая емкость меньше наименьшей емкости, используемой в батарее.

Энергия заряженного конденсатора определяется соотношением:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

### Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему (рисунок 8.5).

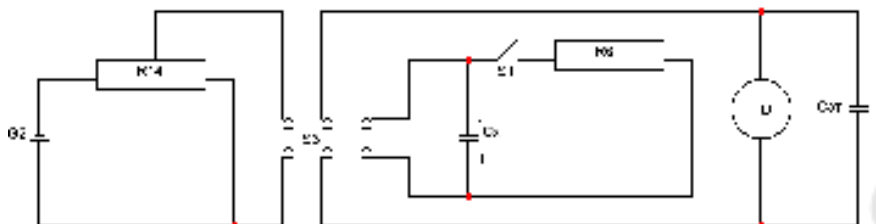


Рисунок 8.5

2. Замкнуть электрическую цепь переключателем  $S_4$  на потенциометр  $R_{14}$ , снять показания вольтметра  $U_0$  на эталонном конденсаторе  $C_{эм}$ .

3. Отключить  $C_{эм}$  от источника питания и переключателем  $S_3$  включить исследуемую емкость  $C_{x1}$ . Снять показания вольтметра ( $U_1$ ).

4. Подавать на эталонный конденсатор напряжение от 0,8 В до 1,3 В проделать измерения не менее трех раз. Показания вольтметра занести в таблицу. После каждого измерения исследуемый конденсатор обязательно разрядить нажатием кнопки  $S_1$ . Запрещается нажимать кнопку  $S_1$  при подаче напряжения на конденсаторы от источника питания!

5. Повторить измерения пунктов 3 и 4 для неизвестного конденсатора  $C_{x2}$

6. По формуле  $C_x = \frac{C_{эм}(U_0 - U)}{U}$  определить емкости неизвестных конденсаторов.

7. Соединить два конденсатора  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$  параллельно и подключить их вместо конденсатора  $C_x$ .

8. Выполнить пункты 3 – 6 и определить емкость батареи конденсаторов.

9. По формуле  $C_{бат} = C_{x1} + C_{x2}$  вычислить емкость батареи и сравнить результат с экспериментальным.

10. Соединить два конденсатора  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$  последовательно, подключить их вместо  $C_x$  и определить емкость соединения.

11. По формуле  $\frac{1}{C_{бат}} = \frac{1}{C_{x1}} + \frac{1}{C_{x2}}$  вычислить емкость батареи и сравнить результат с полученным в эксперименте.

12. Сделать выводы по всей работе.

|   | Известная емкость $C_{эт}$ |          | Неизвестная емкость $C_{x_1}$ |           | Неизвестная емкость $C_{x_2}$ |           | Последовательное соединение $C_{x_1}$ и $C_{x_2}$ |            | Параллельное соединение $C_{x_1}$ и $C_{x_2}$ |           |
|---|----------------------------|----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|---|------------|---|-----------|
|   | $U_0$                      | $C_{эт}$ | $U$                           | $C_{x_1}$ | $U$                           | $C_{x_2}$ | $U$   | $C_{посл}$ | $U$   | $C_{пар}$ |
| 1 |                            |          |                               |           |                               |           |   |            |   |           |
| 2 |                            |          |                               |           |                               |           |   |            |   |           |
| 3 |                            |          |                               |           |                               |           |   |            |   |           |

### Контрольные вопросы

1. Что такое емкость конденсатора.
2. Емкость плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.
3. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов.
4. Распределение зарядов на проводнике во внешнем электрическом поле.
5. Энергия заряженного конденсатора.

### Литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики, т. 2, гл. ХУ, М., Наука, 1982 г.
2. Калашников С. Г. Электричество, Наука, 1970 г.
3. Трофимова Т. И. Курс физики, §§ 96, 98 – 100, М., Высшая школа, 1997 г.

## Содержание

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Лабораторная работа № 2. Определение диэлектрической проницаемости твердого полярного диэлектрика.....</i>             | <i>3</i>  |
| <i>Лабораторная работа № 3. Изучение электростатического поля методом электрических моделей.....</i>                      | <i>9</i>  |
| <i>Лабораторная работа № 4. Изучение работы источника постоянного тока.....</i>   | <i>17</i> |
| <i>Лабораторная работа № 5. Изучение законов цепи постоянного тока с последовательным и параллельным соединением.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Лабораторная работа № 6. Изучение основных свойств полупроводниковых диодов.....</i>                                   | <i>28</i> |
| <i>Лабораторная работа № 8. Определение емкости конденсатора с помощью электронного вольтметра.....</i>                   | <i>38</i> |

**Злотников Игорь Иванович**  
**Матькунов Константин Константинович**  
**Проневич Олег Иванович**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**Лабораторный практикум  
по курсу «Физика»  
для студентов энергетического факультета  
и факультета автоматизированных  
и информационных систем**

Подписано в печать 03.02.10.

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

Ризография. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,61.

Изд. № 222.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.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.