

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»



Т. В. Молодечкина

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

по дисциплинам

«Конструкционные материалы» и «Электротехнические материалы»
для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»;
«Материаловедение»

для студентов специальности 1-39 02 02 «Проектирование и производство
программно-управляемых электронных средств»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет

2022

Об издании – [1](#), [2](#)

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.382

Рекомендовано к изданию
методической комиссией факультета компьютерных наук и электроники
в качестве методических указаний
(протокол № 7 от 16.06.2021)

РЕЦЕНЗЕНТ:

канд. техн. наук, доц., доц. каф. энергетики и электроники Полоцкого государственного университета *В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ*

© Молодечкина Т. В. 2022

© Полоцкий государственный университет, 2022

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Конструкционные материалы» и «Электротехнические материалы» для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»; «Материаловедение» для студентов специальности 1-39 02 02 «Проектирование и производство программно-управляемых электронных средств» Т. В. Молодечкиной использованы текстовый процессор Microsoft Office Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Технические требования:

1 оптический диск.

Системные требования:

PC с процессором не ниже Core 2 Duo;

2 Gb RAM; свободное место на HDD 3,5 Mb;

Windows XP/7/8/8.1/10

привод CD-ROM/DVD-ROM;

мышь.

Редактор С. Е. Рясова

Подписано к использованию 01.03.2022.

Объем издания: 3,3 Мб. Заказ 134.

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

211440, Ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	
Исследование свойств сегнетоэлектриков	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	
Определение удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления диэлектрических материалов	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	
Исследование фотоэлектрических преобразователей.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	
Исследование электрической прочности твердых диэлектриков	55
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5	
Исследование полупроводниковых материалов. Эффект Холла	71
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6	
Исследование электропроводности жидких диэлектриков.....	85

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование свойств сегнетоэлектриков

Цель работы: изучение свойств диэлектрических материалов; изучение поляризации сегнетоэлектриков; снятие кривой поляризации сегнетоэлектрика.

Краткие теоретические сведения

Сегнетоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном диапазоне температур и в отсутствие внешних электрических полей спонтанной электрической поляризацией, т.е. электрическим дипольным моментом. Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков может существенным образом изменяться под влиянием внешних воздействий: электрических полей, давления, температуры и других внешних факторов. Изменение средних положений ионов при возникновении спонтанной поляризации обычно гораздо меньше, чем расстояние между соседними ионами. Поэтому направление спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках легко изменяется под влиянием внешних воздействий.

В зависимости от характера химической связи в функциональных структурных элементах сегнетоэлектрики делятся на:

- дипольные (характерно образование постоянных диэлектрических диполей в структурных группах, соединенных преимущественно ковалентной связью): ТГС (триглицинсульфат $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$), дигидрофосфат калия KH_2PO_4 или цезия CsH_2PO_4 , сегнетова соль $\text{KOOC}(\text{CHON})_2\text{COONa}$, которая дала название всему классу сегнетоэлектриков;

- ионные (дипольный момент возникает при смещении ионов из равновесного положения в кристаллической решетке): титанат бария BaTiO_3 и твердые растворы на его основе, ниобаты и танталаты щелочных металлов, например, LiNbO_3 и $\text{KNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$.

В целом, общими особенностями сегнетоэлектриков являются:

- специфическая экстремальная зависимость диэлектрической проницаемости от температуры;
- наличие поляризационного (диэлектрического) гистерезиса;
- наличие спонтанной поляризации;
- наличие электрической доменной структуры.

Изменение структуры неполярной (параэлектрической) фазы, переводящее ее в полярную фазу, может происходить либо за счет смещения

ионов, либо за счет упорядочения некоторых ионных групп, занимающих в неполярной фазе несколько неэквивалентных положений. В первом случае происходит фазовый переход типа смещения, а во втором – фазовый переход типа порядок – беспорядок.

Кристаллическая модификация, в которой сегнетоэлектрик спонтанно поляризован, называется полярной фазой, а модификация, в которой поляризации нет – неполярной. Температура, при которой сегнетоэлектрики переходят из полярной фазы в неполярную, называется точкой Кюри.

При фазовом переходе в более низкосимметричное состояние возможно возникновение нескольких физически эквивалентных состояний новой симметричной структуры, по разному ориентированных по отношению к бывшей ранее структуре. Такие области структуры с однородной атомно-кристаллической, магнитной или электрической структурами, определенным образом повернутые или сдвинутые относительно друг друга, называются доменами. Домены ограничены границами, в которых происходит постепенный переход от структуры одного домена к структуре соседнего домена. Образование многодоменной (или полидоменной) структуры энергетически выгодно, так как в отличие от монодоменного кристалла полидоменный кристалл не создает вокруг себя электрическое поле. В зависимости от температуры, свойств окружающей среды и структурных дефектов в сегнетоэлектрике образуется устойчивая полидоменная структура с размерами доменов от сотых долей до нескольких миллиметров.

В сегнетоэлектриках приложенные электрические поля могут смещать доменные границы, причем объем доменов, ориентированных по полю, увеличивается за счет доменов, ориентированных против поля. Это обстоятельство приводит к возникновению внутреннего электрического поля, компенсирующего воздействие внешнего поля. При некотором значении внешнего поля кристалл переходит в монодоменное состояние. Перестройка доменной структуры под действием поля определяет характер зависимости поляризации P от приложенного поля (рисунок 1), имеющий вид петли гистерезиса. В сильном поле кристалл становится монодоменным; при последующем уменьшении поля до нуля поляризация становится отличной от нуля и называется остаточной ($P_{ост}$). Поляризация кристалла обращается в нуль только при приложении достаточно большого поля противоположного знака. Это поле называется коэрцитивным полем E_k .

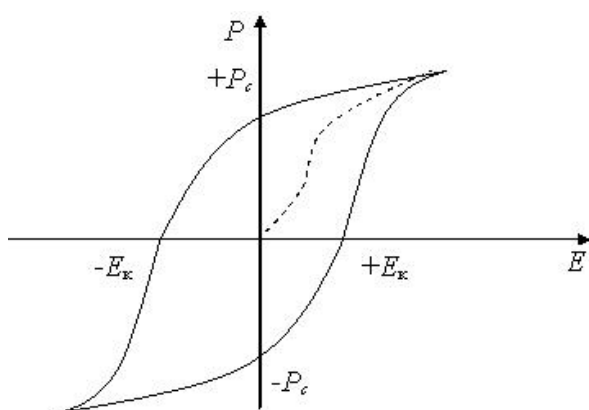


Рисунок 1. – Диэлектрический гистерезис

Сущность гистерезиса заключается в том, что индукция и поляризованность сегнетоэлектрика определяются не только значением напряженности поля, но и предшествовавшими состояниями поляризации. При первичном увеличении внешнего электрического поля (как показано на рисунке 2) от 0 до $+E_0$ поляризованность нарастает нелинейно (ветвь OS). При дальнейшем изменении поля от $+E_0$ до $-E_0$ и обратно, поляризованность (как и индукция) в сегнетоэлектрике описывает замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса.

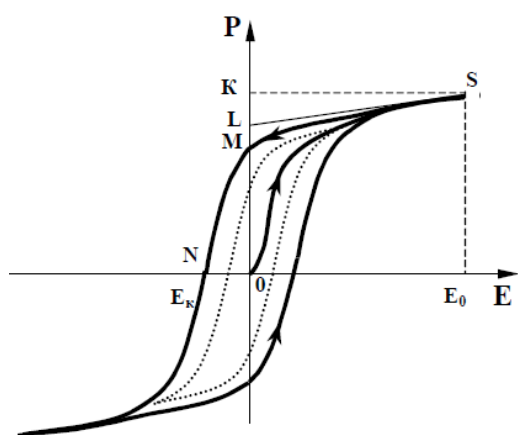


Рисунок 2. – Петля гистерезиса поляризованности сегнетоэлектрика

В общем случае и спонтанный, и индуцированный дипольные моменты единицы объема сегнетоэлектрика являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области используемых в эксперименте не очень сильных полей индуцированный дипольный момент пропорционален напряженности поля. Тогда полную поляризованность $P_{\text{полн}}$ (отрезок ОК), вызываемую полем E_0 , можно разделить на две составляющие. Для этого экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса к значению поля, равному нулю. Отрезок KL при этом соответствует индуцированной поляризованности P , отрезок LO спонтанной поляризованности P_0 , отрезок OM – остаточной поляризованности $P_{\text{ост}}$,

а ON – напряженности коэрцитивного поля (коэрцитивной силе). При значениях поля $\pm E_0$, меньших поля насыщения, формируются петли гистерезиса меньших размеров, вершины которых лежат на линии OS (рисунок 2). Для этих петель можно определить только значения полной поляризованности $P_{\text{полн}}$.

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с металлизированными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение, при этом значения $\pm E_0$ будут соответствовать амплитудам переменного сигнала.

Для определения величины поляризованности сегнетоэлектрика необходимо собрать схему, как показано на рисунке 3, и измерить величину падения напряжения на сопротивлении R2 (U_X) и напряжение на эталонном конденсаторе C2 (U_Y).

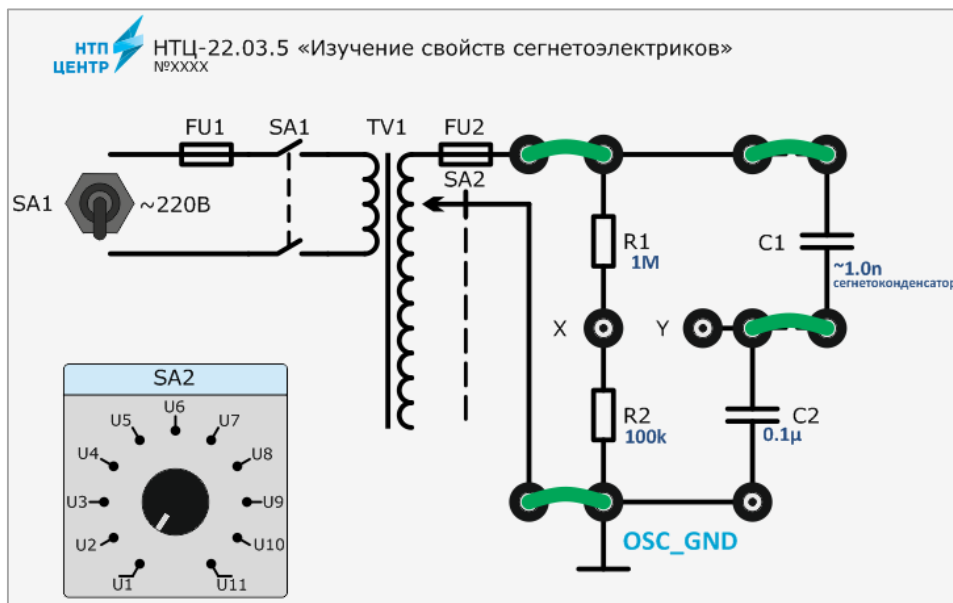


Рисунок 3. – Схема измерения поляризованности

Принимая во внимание, что сопротивление участка цепи, содержащего конденсатор, обратно пропорционально его емкости и учитывая соотношение величин C_1 и C_2 , можно считать, что практически все напряжение $U_{\text{вх}}$ приложено к сегнетоконденсатору C_x и создает в нем электрическое поле с напряженностью, определяемой по формуле:

$$E = \frac{U_{\text{вх}}}{d}, \quad (1)$$

где d – толщина слоя сегнетоэлектрика (расстояние между обкладками);
 $U_{\text{вх}}$ – амплитуда переменного напряжения трансформатора.

Из схемы измерения на рисунке 3 видно, что входное напряжение может быть определено по измеряемому осциллографом напряжению U_X пропорционально отношению сопротивлений резистивного делителя напряжения:

$$U_{\text{вх}} = U_X \frac{R_1 + R_2}{R_2}. \quad (2)$$

Величина напряжения U_Y пропорциональна заряду q_2 на обкладках эталонного конденсатора C_2 , а значит, в силу последовательного соединения C_1 и C_2 , также пропорциональна заряду q_1 на исследуемом сегнетоконденсаторе:

$$q_1 = U_Y \cdot C_2. \quad (3)$$

Величина поляризованности сегнетоэлектрика определяется по выражению

$$P = \sigma = \frac{q_1}{S}, \quad (4)$$

где S – площадь пластин сегнетоконденсатора, определяемая по формуле

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (5)$$

Вычислить тангенс угла диэлектрических потерь при различных напряжениях можно по виду петли гистерезиса (рисунок 4), используя выражение

$$\text{tg}(\delta) = \frac{S_{\text{гис}}}{\pi \cdot x \cdot y}, \quad (6)$$

где $S_{\text{гис}}$ – площадь, описанная кривой петли гистерезиса, x, y – координаты вершины петли гистерезиса (рисунок 4).

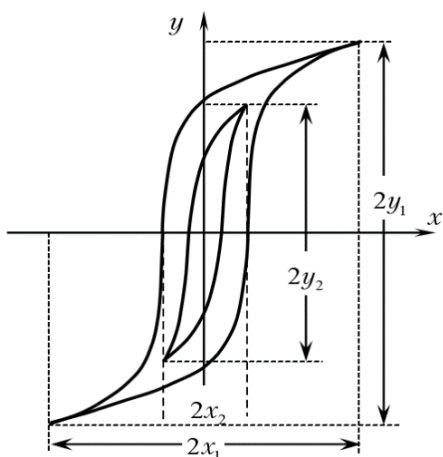


Рисунок 4. – Определение тангенса угла диэлектрических потерь

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой настольный корпус. На передней панели изображена электрическая схема (рисунок 5). На схеме имеются контактные гнезда для сборки схем и подключения измерительных устройств. Сборка схемы осуществляется штекерными перемычками. Для измерений используется USB-осциллограф.

Схема лабораторного стенда состоит из трансформатора TV1, делителя напряжения, выполненного на резисторах R1 и R2. Напряжение $U_{вх}$ со вторичной обмотки этого трансформатора поступает на делитель напряжения. Параллельно делителю подсоединена цепочка из двух последовательно соединенных конденсаторов: эталонного конденсатора C2 и исследуемого сегнетоконденсатора C1, причем $C1 \ll C2$.

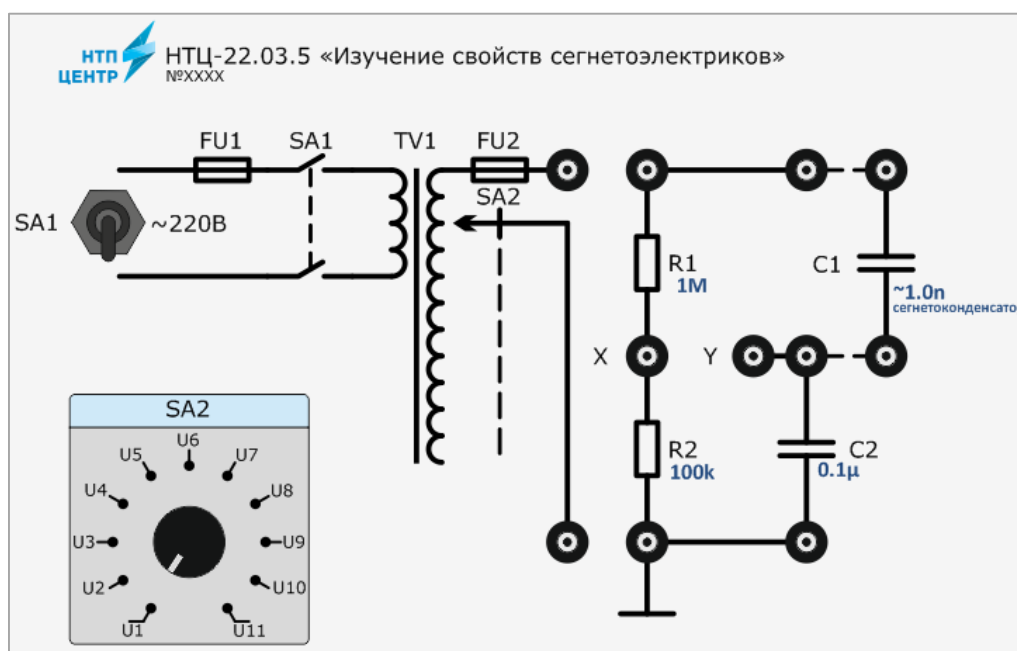


Рисунок 5. – Лицевая панель установки

На задней панели стенда (рисунок 6) имеется сетевой выключатель и держатели плавких вставок предохранителей. Функциональное назначение FU1 показано на рисунке 1, FU2 защищает вторичную обмотку TV1.

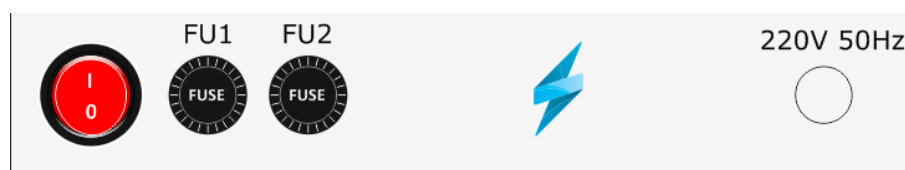


Рисунок 6. – Задняя панель стенда

На рисунке 5 указаны параметры (номиналы) установленных компонентов R1, R2 и C2. Параметры исследуемого сегнетоэлектрика приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры сегнетоэлектрика

Параметр	Единицы измерения	Величина
Тип сегнетоэлектрика	–	Сегнетоконденсатор
Тип диэлектрика	–	Триглицинсульфат (TGS)
Форма обкладок	–	Прямоугольник
Размер	м	$7,5 \cdot 10^{-3} \times 6,9 \cdot 10^{-3}$
Расстояние между обкладками, d	м	$0,7 \cdot 10^{-3}$
Емкость при комнатной температуре, C_{10}	Ф	$0,15 \cdot 10^{-9}$

Выходное напряжение трансформатора TV1 ступенчато регулируется переключателем SA2.

Внимание! Максимальное выходное напряжение трансформатора более 100 В, поэтому соединение / извлечение перемычек и щупов осциллографа проводить только при отключенном питании.

Измерения выполняются USB-осциллографом типа VM8020. Осциллограф в установочном корпусе типа G434 показан на рисунке 7, основные характеристики приведены в таблице 2.



Рисунок 7. – Внешний вид осциллографа VM8020

Для обоих каналов измерения на корпусе предусмотрены переключатели, шунтирующие разделяющие входные конденсаторы.

Таблица 2. – Параметры осциллографа VM8020

Параметр	Единицы измерения	Величина
Амплитуда измеряемого сигнала	В	2 / 20
Частота дискретизации	кГц	100 / 200
Число каналов	–	2
Синхронизация	–	Абсолютная (по нарастающему / спадающему фронту), дифференциальная (по разнице между соседними отсчетами), внешняя
Разрядность АЦП	bit	10
Тип подключения	–	BNC
Оконные функции		Хамминга, Ханнинга, Блэкмана, Блэкмана – Харриса

Для отображения и обработки информации, поступающей с осциллографа, на компьютере устанавливается программа DiSco. Окно программы приведено на рисунке 8.

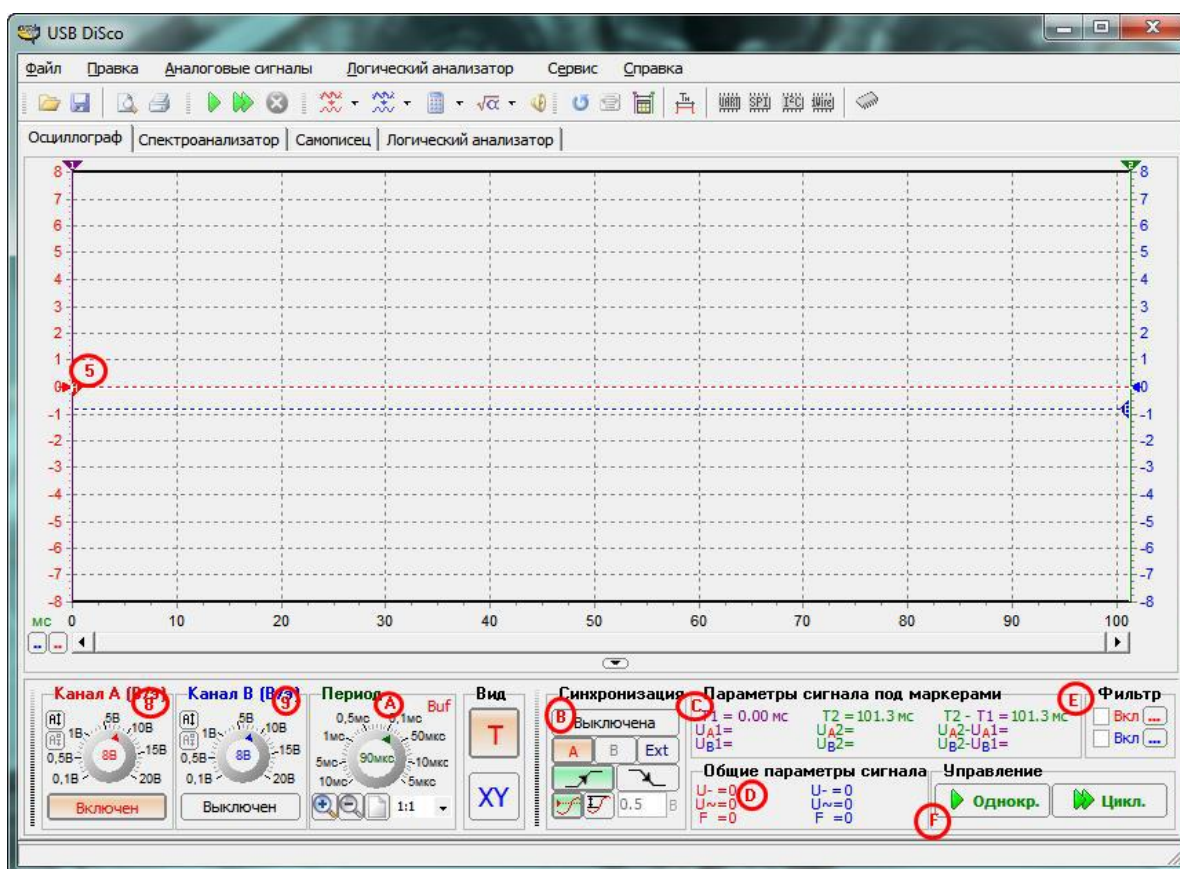


Рисунок 8. – Окно программы USB DiSco

В центре окна находится рабочий экран, на котором отображаются осциллограммы: красная осциллограмма соответствует каналу А, синяя – каналу В. Слева от рамки рабочего экрана расположена шкала по напряжению канала А, справа от рамки – шкала по напряжению канала В. Единица измерения обоих шкал по напряжению – Вольты. Внизу рабочего экрана расположена ось времени (развертка).

Слева и справа от рабочего экрана находятся два указателя, позволяющих смещать нуль каналов А и В соответственно.

Для задания уровня синхронизации используются два горизонтальных маркера. Маркер А задает уровень (амплитуду) напряжения канала А, который используется при включенной синхронизации (абсолютной) по каналу А. Маркер В аналогично задает уровень, используемый при включенной синхронизации по каналу В. При перемещении маркеров синхронизации в строке состояния точно отображается устанавливаемый уровень.

Задать размах шкалы напряжения каналов А и В возможно на панелях **8** и **9** «Канал А/В (В/э)». Размах задается с помощью ручки настройки.

Панель «Период» **А** позволяет задавать период дискретизации (развертку), с которой происходит оцифровка входного аналогового сигнала. Кроме выбора развертки на панели «Период» также можно задавать масштаб отображения осциллограмм, можно растянуть осциллограмму по оси времени для более детального анализа. Все элементы, управляющие синхронизацией, за исключением маркеров, расположены на панели «Синхронизация» **В**.

Кнопка **[Включен] / [Выключен]** позволяет включить или выключить синхронизацию. Кнопки **[А]** и **[В]** выбирают канал и соответствующий маркер, сигнал с которого будет использоваться в качестве источника синхронизации. Кнопки выбора фронта определяют: по какому фронту сигнала (нарастающему или спадающему) будет абсолютная синхронизация; по какому перепаду сигнала (положительному или отрицательному) будет дифференциальная синхронизация; по какому фронту внешнего синхросигнала (нарастающему или спадающему) будет внешняя синхронизация. Две кнопки, расположенные внизу панели, определяют тип синхронизации (абсолютная или дифференциальная). Поле, расположенное возле кнопки задания дифференциальной синхронизации, определяет разницу между соседними отсчетами сигнала, при превышении которой будет выполнение условия синхронизации.

На панели «Параметры сигнала под маркерами» **С** отображаются положение каждого маркера на оси времени и амплитуда сигнала обоих

каналов под каждым маркером. Также вычисляется разница времени маркеров и амплитуд сигналов, при этом цвет результата разницы будет определяться цветом того маркера, соответствующее значение которого больше.

На панели «Общие параметры сигнала» **D** отображаются вычисленные значения постоянной и переменной составляющей напряжения и, если возможно, то и значение частоты по каждому каналу.

Панель «Фильтрация» **E** обеспечивает подключение и расчет цифровых фильтров для каждого канала. Для включения фильтрации по каналу сначала необходимо рассчитать фильтр, открыв окно задания параметров фильтра, нажав кнопку [...], после чего установить галочку [Вкл.] для выбранного канала.

Для проведения измерения необходимо нажать кнопку [Однокр.] или [Цикл.] на панели «Управление» **F**.

Кнопка [Однокр.] инициализирует только одно измерение (оцифровка и накопление отсчетов микроконтроллером, а затем передача их оболочке при работе через буфер), после чего на рабочем экране отображаются только что считанные осциллограммы.

Внимание! В процессе работы возможен сбой программного обеспечения осциллографа, в результате которого настройки каналов измерения (калибровки) будут утрачены. В этом случае требуется восстановить калибровки, используя сохраненный файл. Если файл отсутствует – произвести калибровку (см. приложение).

В установке предусмотрена возможность подключения внешних сегнетоконденсаторов. Для этого исследуемый образец должен иметь выводы со штекерными разъемами на конце. Способ подключения представлен на рисунке 9.

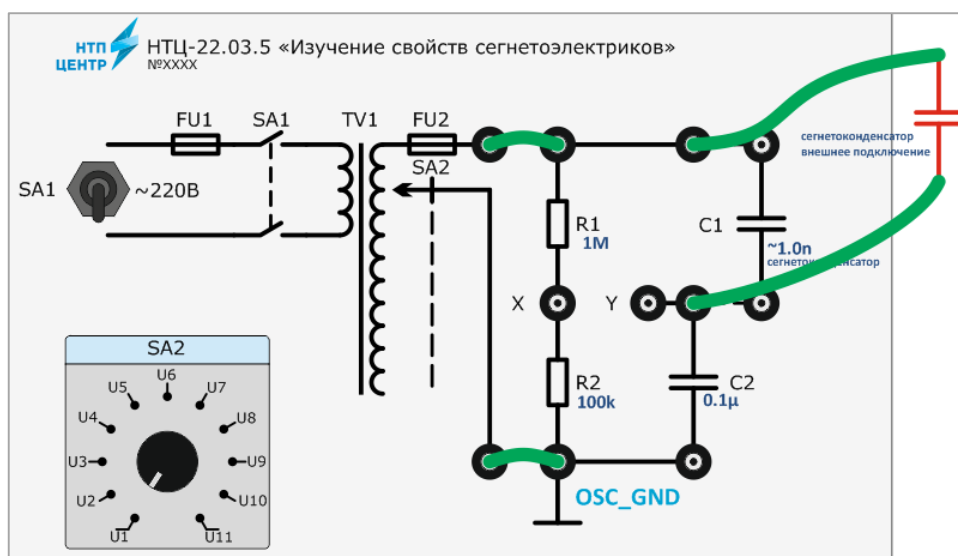


Рисунок 9. – Подключение внешних образцов

Порядок выполнения работы

1. Включить установку в сеть.
2. Сетевой выключатель и тумблер **SA1** перевести в положение «ОТКЛ». Ручку **SA2** установить в положение **U1**. При необходимости провести калибровку, как указано в приложении.
3. Собрать схему, приведенную на рисунке 3.
4. Установить щупы осциллографа в указанные точки измерения.
5. Подключить осциллограф к компьютеру и запустить программу **DiSco**.
6. Включить циклическое измерение.
7. Включить измерительные каналы **A** и **B**, включить режим отображения **XУ**.
8. Включить питание.
9. Переключателем **SA1** включить трансформатор **TV1**.
10. Настроить высоту и ширину изображения петли на экране: настройки **Канал А (В/э)** и **Канал В (В/э)**.
11. При необходимости настроить параметры сглаживания измерений (**Фильтр**).
12. Меняя напряжение на выходе **TV1** от минимума до максимально возможного в данной установке, провести наблюдение за изменением вида и размеров петель гистерезиса и отрезков, характеризующих величины полной поляризованности $P_{\text{полн}}$, остаточной поляризованности, коэрцитивного напряжения.
13. Для нескольких наблюдаемых петель определить величину полной поляризованности и соответствующую ей напряженность электрического поля в образце. Данные занести в таблицу 3.
14. Построить график зависимости $P_{\text{полн}} = f(E)$.
15. Определить тангенс угла диэлектрических потерь, результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3. – Результаты измерений и вычислений

Величина	Измерено		Вычислено		
	$U_y, В$	$U_x, В$	$E, В/м$	$P, Кл/м^2$	$tg\delta$
1					
2					
3					
...					

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание измерительной установки.
3. Расчетные формулы и примеры расчетов.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей.
6. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества относят к сегнетоэлектрикам?
2. Какими отличительными свойствами обладают сегнетоэлектрики?
3. Какова природа спонтанной поляризации сегнетоэлектриков?
4. В чем состоит явление гистерезиса, наблюдаемое для сегнетоэлектриков?
5. Расскажите о доменном характере поляризации сегнетоэлектриков.
6. Какие изменения в доменной структуре ответственны за различные участки основной кривой поляризации?
7. Нарисуйте семейство петель гистерезиса.
8. Что такое предельная петля гистерезиса?
9. Какие параметры сегнетоэлектриков можно определить с помощью петли гистерезиса?

Литература

1. Материаловедение : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2015. – 557 с.
2. Пейсахов А. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учеб. для студ. немашиностр. спец. / А. М. Пейсахов, А. М. Кучер. – 2-е изд. – СПб. : Изд-во Михайлова В.А., 2004.
3. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2006. – 521 с.
4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учеб. / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2021. – 448 с.
5. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники : учеб. пособие / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2021. – 384 с.

6. Федотов, А. К. Физическое материаловедение : учеб. пособие : в 3 ч. / А. К. Федотов, В. М. Анищик, М. С. Тиванов. – Минск : Выш. шк., 2015. – Ч. 3 : Материалы энергетики и энергосбережения. – 463 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Подключение и калибровка осциллографа

1. Подключить устройство к компьютеру.
 2. Установить программу и драйвера.
 3. Скопировать файл *калибровка.exe* в корень папки с установленной программой.
 4. Изменить ярлык на рабочем столе (ссылка на программу) на ««C:\Program Files\DiSco\Application\usb_osc2.exe»-clbr».
 5. Запустить программу **DiSco**. Перейти на вкладку [Осциллограф].
 6. Запустить измерения.
 7. Открыть окно калибровки [Аналоговые сигналы] → [Калибровка].
- Окно калибровки представлено на рисунке 10.

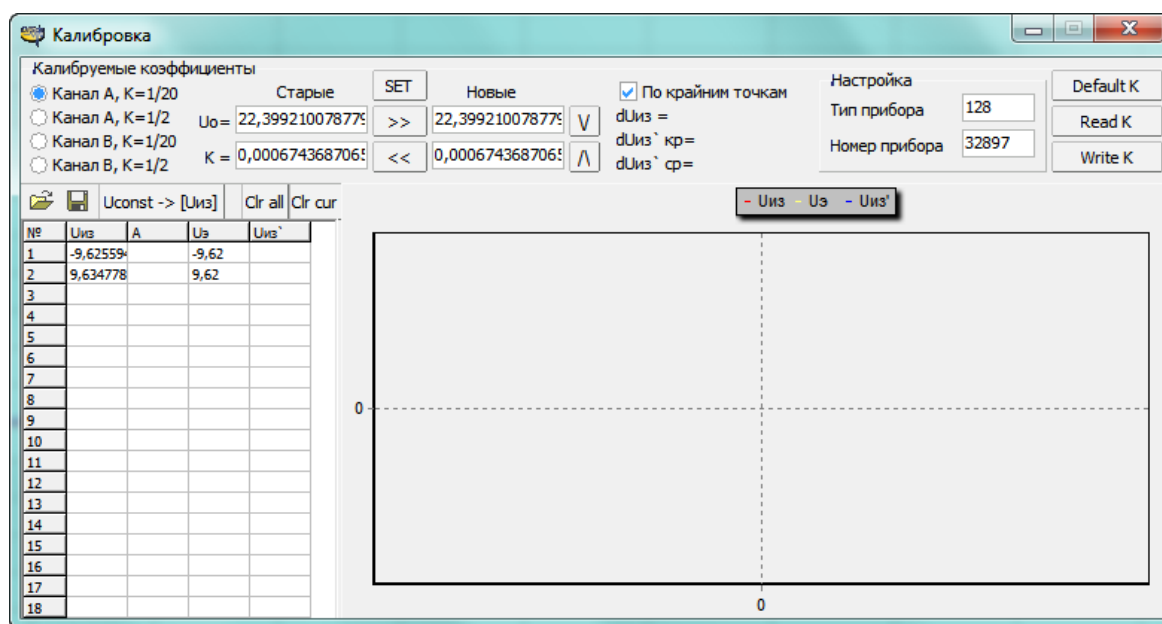


Рисунок 10. – Окно калибровки

8. Выбрать **Канал А**, большой диапазон $K = 1/20$.
9. В колонке **Uиз** измерить осциллографом эталонный сигнал постоянного тока $-U$ и U используя кнопку [Uconst → Uиз]. Величину эталонного сигнала для $-U$ и U записать в колонку **Uэ**.

10. Остановить измерения. В окне **[Калибровка]** нажать **[>>]**, затем **[<<]**, затем **[Write K]**. После этого канал уже должен быть откалиброван (изменяются показания). Закрывать окно **[x]**, выйти из программы **[X]**.

11. Запустить программу, запустить измерения. Если выдаст ошибку – запустить программу снова и открыть окно калибровки (*измерения не запускать!*). Нажать **[Default K]**, перезапустить программу, запустить измерения, перейти к пункту 6.

12. Повторить пункты 6...9 для малого диапазона **K = 1/2**.

13. Повторить пункты 6...10 для **Канал В**.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Определение удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления диэлектрических материалов

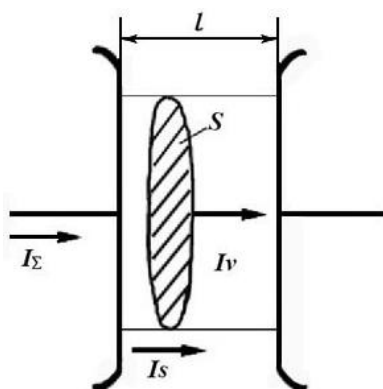
Цель работы: изучить электрические характеристики твердых диэлектрических материалов; изучить методику измерения поверхностного и объемного сопротивлений диэлектрических материалов; провести измерение поверхностного и объемного сопротивлений диэлектрических материалов.

Краткие теоретические сведения

В практической электротехнике диэлектрики применяются в качестве электрической изоляции токоведущих элементов. «Идеальная» изоляция должна иметь бесконечное электрическое сопротивление или нулевую электрическую проводимость. Технические диэлектрики обеспечивают электрическое сопротивление изоляции обычно порядка МОм. Сопротивление любой изоляционной конструкции определяется материалом, размерами и условиями, при которых производятся измерения. Поэтому методы и условия измерения сопротивлений регламентируются ГОСТ 6433.2-71 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении».

При постоянном напряжении установившийся ток протекает в объеме и по поверхности диэлектрика (рисунок 1):

$$I_{\Sigma} = I_V + I_S = (U / R_V) + (U / R_S). \quad (1)$$



Различают объемное R_V и поверхностное R_S сопротивления исследуемого образца. Объемное сопротивление зависит от материала и размеров конструкции. Удельное объемное сопротивление ρ_V и удельная объемная

проводимость $\gamma_V = 1/\rho_V$ характеризуют собственно материал и являются его параметрами. В системе СИ удельное объемное сопротивление численно равно сопротивлению куба материала с ребром, равным 1 м, если ток протекает между противоположными гранями куба. Параметр ρ_V , Ом·м, относится к определенной температуре (например, 293 К) и ограниченной напряженности электрического поля.

Для плоского образца в однородном поле

$$R_V = \frac{\rho_V \cdot l}{S}; \quad \rho_V = \frac{R_V \cdot S}{l}, \quad (2)$$

причем $\rho_V = R_V$ при $S=1 \text{ м}^2$ и $l=1 \text{ м}$; $\gamma_V = 1/\rho_V$, Ом/м.

Значения удельного объемного сопротивления твердых диэлектриков лежат в пределах от 10^8 до 10^{16} Ом·м.

Температурная зависимость ρ_V в пределах температур, встречающихся на практике, может быть записана в виде

$$\rho_{VT} = \rho_{VT_0} \cdot \exp[-\alpha(T - T_0)], \quad (3)$$

где ρ_{VT_0} – удельное объемное сопротивление при температуре T_0 ;

α – температурный коэффициент, зависит от вида материала.

С повышением температуры ρ_V уменьшается по экспоненциальному закону.

Поверхностное сопротивление R_S зависит от материала, состояния и размеров поверхности, по которой протекает ток. Удельное поверхностное сопротивление ρ_S равно сопротивлению правильного квадрата диэлектрика, если ток протекает между противоположными сторонами квадрата.

В поле вдоль поверхности между параллельными электродами протяженностью a , отстоящими друг от друга на расстоянии l (рисунок 1). Очевидно, что $R_S = \frac{\rho_S \cdot l}{a}$ и $R_S = \rho_S$ при $l=a$.

Удельная поверхностная проводимость $\gamma = 1/\rho_S$ измеряется в См.

Поверхностная проводимость обусловлена в основном присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Однако поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, то поверхностную проводимость при нормированных условиях рассматривают как свойство самого диэлектрика. Удельная поверхностная электрическая проводимость

тем ниже, чем меньше полярность диэлектрика и влажность окружающего воздуха, чем чище поверхность материала и чем лучше она отполирована.

Параметры ρ_V и ρ_S (γ_V и γ_S) относятся к установившемуся значению постоянного тока. Физически прохождение этого тока обусловлено перемещением свободных зарядов (ионов, электронов). У диэлектриков при обычных условиях (ограниченной температуре и напряженности электрического поля) ток этот весьма мал и называется сквозным током утечки $I_{СКВ}$. При включении образца под напряжение или при меняющемся во времени напряжении возникают абсорбционные токи $I_{абс}$, обусловленные смещением связанных зарядов. Поэтому при определении ρ_V и ρ_S необходимо исключить абсорбционные токи и проводить измерения спустя некоторое время (например, 1 мин) после включения образца под напряжение.

Методы определения удельных сопротивлений диэлектриков

Измерение ρ_V и ρ_S диэлектрических материалов сводится к измерению R_V и R_S образцов заведомо известных размеров. Измеряются токи $I=U/R$ при заданном напряжении U . Так как U при измерениях невелико (от 100 до 1000 В), а R образцов электроизоляционных материалов большие (МОм, ТОм), то измеряемые токи малы и необходимо использовать высокочувствительные приборы.

Удельное объемное электрическое сопротивление диэлектрических материалов находится в диапазоне от 10^8 до 10^{16} Ом·м и определяется в лабораторных условиях с помощью зеркального гальванометра одним из следующих методов:

- непосредственного отклонения;
- заряда конденсатора;
- методом сравнения.

В данной работе применяется метод непосредственного отклонения.

Удельное объемное сопротивление ρ_V для плоских образцов (для круглых электродов):

$$\rho_V = \pi \frac{D_0^2}{4t} R_V, \quad (4)$$

где R_V – измеренное значение объемного сопротивления образца, Ом;

t – толщина образца, м;

D_0 – величина, определяемая из выражения

$$D_0 = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (5)$$

где d_1 – диаметр измерительного электрода для плоского образца, м;

d_2 – внутренний диаметр охранного кольца, м.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s для плоских образцов (для круглых электродов)

$$\rho_s = \pi \frac{D_0}{g} R_s, \quad (6)$$

где g – ширина зазора между измерительным и охранным электродом,

R_s – измеренное значение поверхностного сопротивления образца, Ом.

В лабораторной работе следует использовать следующие значения величин: $g = 2$ мм; $D_0 = 27$ мм.

Описание лабораторного стенда и методики проведения измерений

Схема измерительной установки (рисунок 2) включает: универсальный регулируемый источник постоянного тока; переключатель **SB1** для изменения полярности приложенного к образцу напряжения; образцовый и защитный резистор **R1** сопротивлением 1 Мом, необходимый для градуировки гальванометра **PA**, а также для ограничения тока в цепи при коротком замыкании (КЗ) на образце; переключатель **SB2** для подачи напряжения на образец; зажимы **К, Л, Э** для подключения испытуемого образца **R_x**, гальванометр **PA**, переключатель шунта **S** для расширения пределов измерения гальванометра (n измеряется в пределах $1 \div 10^4$).

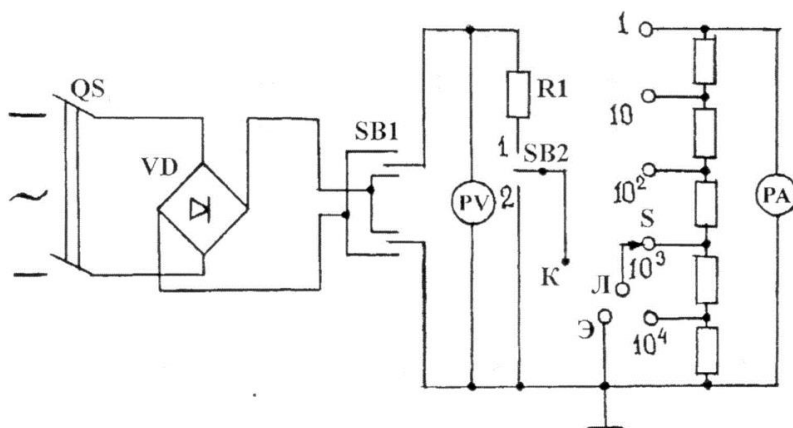
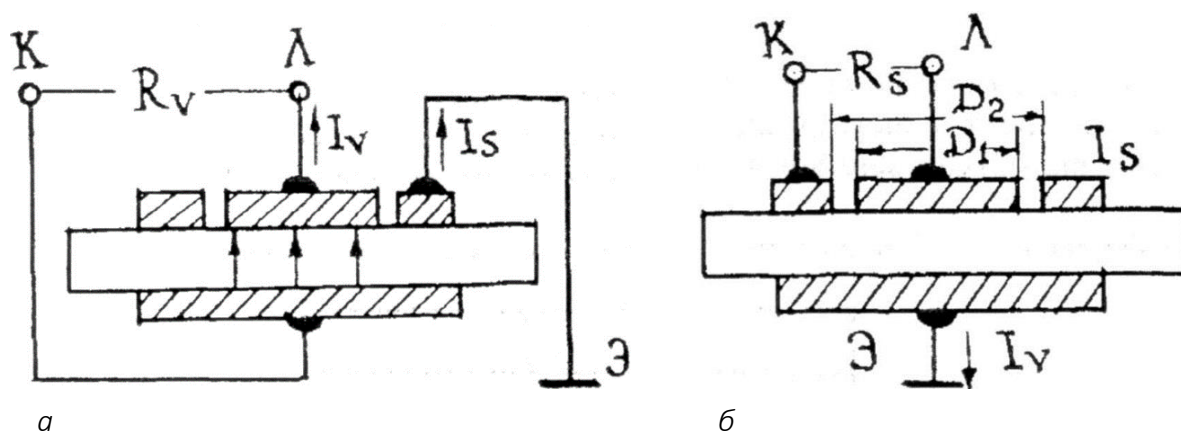


Рисунок 2. – Схема измерительной установки

Чтобы разделить протекающие по образцу объемный ток I_V и поверхностный ток I_S , применяют систему из трех электродов.

При измерении I_V образец включается по схеме, показанной на рисунке 3, а. В этом случае через измерительную систему протекает только ток I_V , а ток I_S отводится с помощью охранного электрода, не регистрируется гальванометром, поэтому не влияет на результат измерения.



1 – электрод напряжения; 2 – измерительный электрод; 3 – охранной электрод
Рисунок 3. – Схема подключения образца при измерении удельного объемного (а) и поверхностного (б) сопротивления

При измерении I_S используется тот же образец, только включается он по схеме, изображенной на рисунке 3, б. В этой схеме роль охранного электрода выполняет нижний электрод Э, который отводит протекающий по объему ток I_V от измерительной системы. Измеряется только ток, протекающий по поверхности образца, заключенной между электродами К и Л.

Если сопротивление образца превосходит 10^{12} Ом, то метод непосредственного отклонения гальванометра оказывается неприемлемым, так как протекающий ток становится настолько мал, что измерить его гальванометром, даже очень чувствительным, невозможно. В этом случае применяют электронные измерительные приборы – тераомметры, в которых протекающий через образец ток I_V или I_S усиливается до необходимой величины, достаточной для регистрации.

В данной работе необходимо определить удельные электрические сопротивления ρ_V и ρ_S предложенных преобразователем образцов с помощью тераомметра. Измерения проводятся при постоянном напряжении при температуре от минус 60 до плюс 250°C.

Образцы для испытаний не должны иметь видимых невооруженным глазом короблений, препятствующих плотному прилеганию электродов, а также трещин, сколов, вмятин, заусенцев, загрязнений. Поверхности образцов, подвергавшиеся механической обработке, должны быть гладкими, без выбоин и царапин; плоскости образцов должны быть параллельными.

Допускается поверхность образца очищать растворителем, не влияющим на свойства испытываемого материала.

Электроды должны обладать высокой проводимостью и обеспечивать хороший электрический контакт по всей поверхности соприкосновения с образцом и не должны оказывать влияния на его свойства.

Измерение удельного сопротивления экспериментальных образцов проводится с использованием тераомметра Е6-13А и измерительной ячейки, состоящей из измерительного и охранного электродов, а также электрода напряжения (рисунок 4). Тераомметр Е6-13А предназначен для измерения сопротивления по постоянному току в диапазоне от 10 до 10^{14} Ом.

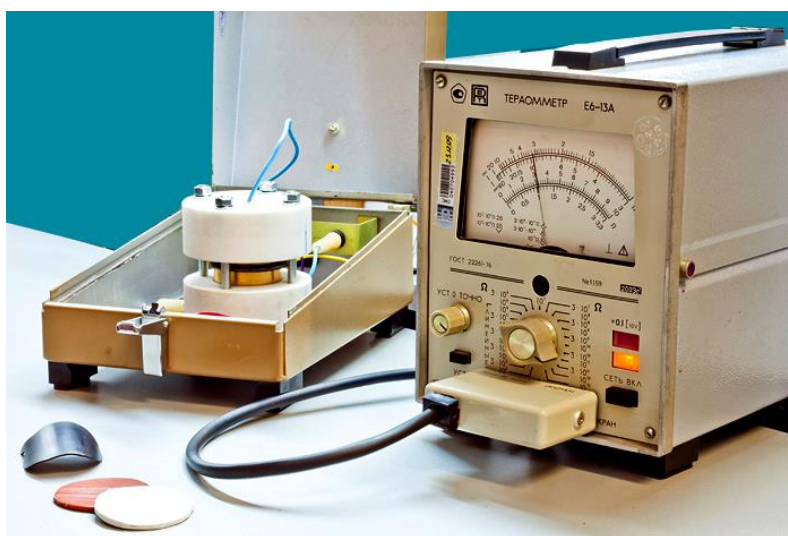
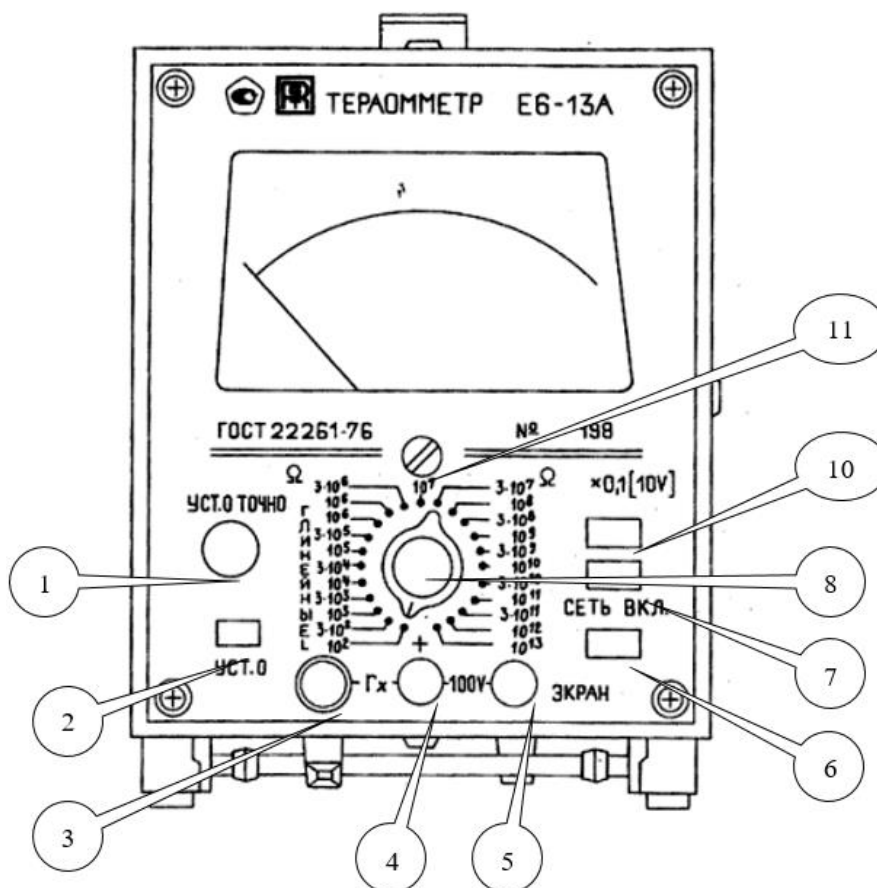



Рисунок 4. – Тераомметр Е6-13А с измерительной ячейкой

Конструктивно прибор выполнен в виде переносного настольного блока в унифицированном корпусе. На передней панели прибора (рисунок 5) расположены: показывающий прибор; ручка переключателя поддиапазонов; ручка точной установки нуля **УСТ.0 Точно**; выключатель и индикаторная лампочка включения питания **СЕТЬ ВКЛ.**; входные гнезда; кнопка замыкателя входа **УСТ.0**; индикаторная лампочка включения измерительного напряжения 10 В, обозначенная **x 0,1[10V]** (для обратно пропорциональных шкал). Показывающий прибор имеет циферблат с четырьмя шкалами.



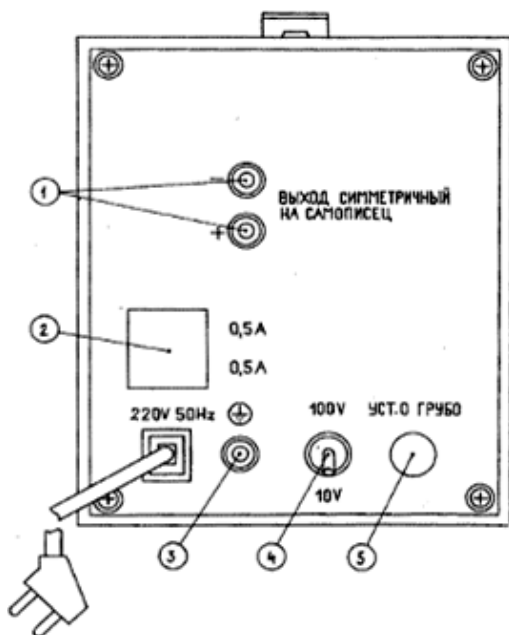
- 1 – ручка установки нуля «точно»; 2 – кнопка замыкателя входа;
 3 – высокоомное входное гнездо; 4 – входное гнездо;
 5 – клемма для подключения экрана; 6 – выключатель питания;
 7 – индикатор включения прибора; 8 – переключатель поддиапазонов измерения;
 9 – корректор механического нуля;
 10 – индикатор включения измерительного напряжения 10V (для обратной шкалы);
 11 – установка нуля «грубо»

Рисунок 5. – Вид прибора со стороны передней панели

На задней панели прибора (рисунок 6) расположены: переключатель измерительного напряжения 10V, 100V; ручка грубой установки нуля УСТ.0 ГРУБО; гнездо держателей предохранителей; клемма заземления ; гнездо выхода преобразователя ВЫХОД СИММЕТРИЧНЫЙ НА САМОПИСЕЦ.

На боковой стенке прибора размещены резисторы настройки прибора по основной погрешности. Доступ к резисторам осуществляется при снятых крышках кожуха.

Входная лампа заключена в металлический экран и установлена на плате усилителя. Экран находится под защитным потенциалом.



- 1 – гнезда выхода преобразователя;
 2 – вставки плавкие;
 3 – клемма заземления корпуса прибора;
 4 – переключатель измерительного напряжения;
 5 – ручка установки нуля «УСТ.0 ГРУБО»

Рисунок 6. – Вид прибора со стороны задней панели

Диапазон измеряемых сопротивлений при использовании линейной шкалы от 10 до 10^6 Ом перекрывается поддиапазонами с верхними пределами: 10^2 ; $3 \cdot 10^2$; 10^3 ; $3 \cdot 10^3$; 10^4 ; $3 \cdot 10^4$; 10^5 ; $3 \cdot 10^5$ и 10^6 Ом.

Диапазон измеряемых сопротивлений при использовании обратно пропорциональных шкал от 10^6 до 10^{14} Ом с поддиапазонами с нижними пределами: 10^6 ; $3 \cdot 10^6$; 10^7 ; $3 \cdot 10^7$; 10^8 ; $3 \cdot 10^8$; 10^9 ; $3 \cdot 10^9$; 10^{10} ; $3 \cdot 10^{10}$; 10^{11} ; $3 \cdot 10^{11}$; 10^{12} и 10^{13} Ом.

При этом падение напряжения на измеряемом объекте при использовании линейной шкалы является функцией показания прибора, т.е. зависит от сопротивления объекта и может изменяться от 0 до 10 В.

При использовании обратно пропорциональной шкалы напряжение на измеряемом объекте постоянно и равно 100 В или 10 В в зависимости от положения переключателя измеряемого напряжения.

Основная погрешность прибора при измерении с линейной шкалой, выраженная в процентах от конечного значения установленного поддиапазона измерения, не превышает $\pm 2,5\%$.

Основная погрешность прибора при измерении с обратно пропорциональной шкалой, выраженная в процентах от длины рабочей части шкалы, не превышает:

- $\pm 2,5\%$ – на поддиапазонах от 10^6 до 10^8 Ом;
- $\pm 4,0\%$ – на поддиапазонах от $3 \cdot 10^8$ до 10^{11} Ом;
- $\pm 6,0\%$ – на поддиапазонах от $3 \cdot 10^{11}$ до 10^{12} Ом;
- $\pm 10,0\%$ – на поддиапазоне 10^{13} Ом.

Вариация показаний прибора не превышает $\pm 1,0\%$.

Перед началом измерений электроды на образце должны быть замкнуты не менее 1 мин до подачи измерительного напряжения, если нет специальных указаний в стандартах или ТУ на материал.

Рекомендуемые значения напряжения, при которых производится измерение сопротивления диэлектрических материалов – 50, 100, 250, 500, 1000 В.

Если в стандартах или ТУ на материал указания о времени выдержки образца под напряжением отсутствуют, то отсчет измерения должен производиться на 60-й секунде после приложения напряжения.

При повторении измерения измеряемый образец следует деполяризовать. Деполяризацию осуществляют путем заземления электродов через измерительный прибор.

Порядок выполнения работы

1. Получите у преподавателя образцы диэлектрических материалов.
2. Замерьте при помощи микрометра и штангенциркуля размеры образцов – длину, ширину, толщину. Занести данные по образцам в отчет.
3. Включите в сеть тераомметр.
4. Соберите измерительную установку, соединив проводом клеммы заземления на тераомметре и на задней стенке измерительной ячейки.
5. Соедините экранные гнезда на передней панели тераомметра с экранным проводом от измерительной ячейки, выбрав положение ρ_V .
6. Переведите выключатель питания в положение **СЕТЬ**. При этом должна светиться индикаторная лампочка. В течение 1 мин указатель прибора установится на нулевую отметку шкалы.

Продолжительность времени установления рабочего режима 30 мин после включения прибора.

7. Установите ручками **УСТ.0. ГРУБО** и **УСТ.0. ТОЧНО** указатель прибора на нулевую отметку шкалы, а переключатель поддиапазонов переведите в положение, соответствующее измеряемому сопротивлению.

На поддиапазонах от 10^2 до 10^6 Ом, обозначенных на передней панели **ЛИНЕЙНЫЕ**, отсчет производите по линейным шкалам (две нижних шкалы, нарастающие слева направо), а на поддиапазонах от 10^6 до 10^{13} Ом – по обратно пропорциональным шкалам (две верхних, значения нарастают справа налево).

При проведении измерений по обратно пропорциональным шкалам измерительное напряжение на входных клеммах может быть выбрано

равным 100 или 10 В с помощью переключателя, расположенного на задней панели прибора.

При включении измерительного напряжения 10 В на передней панели прибора светится индикаторная лампочка **×0,1[10V]**. Это означает, что полученный по прибору результат измерения следует умножить на 0,1.

Например, при положении переключателя поддиапазонов 10^{10} Ом, переключателя измерительного напряжения **10V**, указателя прибора на отметке 2 результат измерения равен $2 \cdot 10^{10} \cdot 0,1 = 2 \cdot 10^9$ Ом.

Внимание! Множитель $\times 0,1$ действителен только для поддиапазонов от 10^6 до 10^{13} Ом.

8. Проведение измерений в диапазоне от 10^2 до 10^6 Ом (по линейным шкалам):

- установите переключатель поддиапазонов в положение, соответствующее измеряемому сопротивлению;

- подключите измеряемый объект к клеммам r_x прибора;

- установите ручкой **УСТ.0. ТОЧНО** указатель прибора на нулевую отметку шкалы;

- переведите ручку замыкателя входа в положение **ИЗМЕР.**, для чего, слегка нажав, поверните ее против часовой стрелки до упора и отпустите;

- произведите отсчет по линейной шкале, соответствующей установленному поддиапазону, после чего переведите ручку замыкателя входа в положение **УСТ.0**. Только после этого отключите измеряемый объект.

9. Проведение измерений в диапазоне от 10^6 до 10^{14} Ом (по обратно пропорциональным шкалам):

- установите переключатель поддиапазонов в положение, соответствующее измеряемому сопротивлению, предварительно включив требуемое измерительное напряжение переключателем **100V, 10V**;

- подключите измеряемый объект к клеммам r_x прибора;

- установите ручкой **УСТ.0. ТОЧНО** указатель прибора на отметку ∞ обратно пропорциональных шкал;

- переведите ручку замыкателя входа в положение **ИЗМЕР.** И произведите отсчет по шкале, соответствующей установленному поддиапазону. При проведении измерений с измерительным напряжением 10V руководствуйтесь второй частью пункта б;

– переведите ручку замыкателя входа в положение **УСТ.0** и отключите измеряемый объект.

10. Поместите объект измерений на нижний электрод измерительной ячейки.

11. Накройте объект вторым электродом. Установите сверху прижим.

12. Проведите измерения для всех образцов материалов, руководствуясь пунктом 7 или 8.

13. По окончании работы обесточьте тераомметр и разберите измерительную схему.

14. После выключения стенда при помощи линейки или штангенциркуля измерьте диаметр измерительных электродов, зазор между измерительным и охранным электродами.

15. Проведите по приведенным ранее формулам расчет значений ρ_V для каждого из полученных материалов.

16. Проведите по приведенным ранее формулам расчет значений ρ_S для каждого из полученных материалов.

17. Результаты вычислений занесите в таблицу.

18. Оформите отчет, сделайте выводы о проделанной работе.

Таблица. – К расчету удельного сопротивления диэлектрических материалов

Материал	Толщина, м	R_V , Ом	R_{Vcp} , Ом	ρ_{Vcp} , Ом·м	R_S , Ом	R_{Scp} , Ом	ρ_{Scp} , Ом·м
1. Бумага офисная							
2. Бумага кон- денсаторная							
3. Полимерная пленка							
4. Хлопковая ткань							
5 Картон							
6 Стеклотекстолит							
7 Гетинакс							

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема и описание измерительной установки.
3. Расчетные формулы и примеры расчетов.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Критическая оценка полученных величин ρ_V и ρ_S и сопоставление их с данными справочной литературы.
6. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы относят к диэлектрическим? Их основные физические свойства?
2. Что называется электропроводностью?
3. Какой физический смысл имеет удельная проводимость?
4. Какие токи могут протекать в диэлектрике?
5. Что такое ρ_V и ρ_S и каковы единицы их измерения в системе СИ?
6. Чем вызвана поверхностная электропроводность твердых электроизоляционных материалов?
7. Почему удельная электрическая проводимость диэлектриков увеличивается с ростом температуры?
8. От каких факторов зависит величина ρ_V и ρ_S диэлектриков?
9. Почему ρ_V и ρ_S измеряют при постоянном напряжении?
10. Почему отсчёт тока через образец следует производить через 1 мин после включения напряжения?
11. Как влияет влажность на проводимость образцов?
12. Какова особенность схемы измерения?
13. Поясните методику определения ρ_V и ρ_S .

Литература

1. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении : ГОСТ 6433.2-71. – Введ. 01.07.1972. – М. : Госстандарт Союза ССР, 1972. – 111 с.
2. Материаловедение : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2015. – 557 с.

3. Федотов, А. К. Физическое материаловедение : учеб. пособие : в 3 ч. / Федотов, А. К. – Минск : Выш. шк., 2015. – Ч. 3 : Материалы энергетики и энергосбережения / А. К. Федотов, В. М. Анищик, М. С. Тиванов. – 463 с.

4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учеб. / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2021. – 448 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование фотоэлектрических преобразователей

Цель работы: изучение принципов работы фотоэлементов, определение основных характеристик и способов соединения фотоэлектрических преобразователей.

Краткие теоретические сведения

Фотоэлектрический преобразователь (фотоэлемент) – электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию.

Преобразование энергии в фотоэлектрическом преобразователе (ФЭП) основано на фотоэлектрическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения.

Фотоэлектрические эффекты (фотоэффекты) связаны с изменениями электрических свойств полупроводников под воздействием электромагнитного излучения. В кристаллах может наблюдаться как внешний, так и внутренний фотоэффект. *Внешний* фотоэффект определяется эмиссией электронов из вещества в вакуум под действием квантов света. Эмитированные электроны затем могут быть собраны анодом. На этом явлении основан принцип действия таких приборов, как вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и т.д. В случае *внутреннего* фотоэффекта носитель заряда (электрон или дырка) под воздействием кванта света не выходит из полупроводника, а лишь переходит в более высокое энергетическое состояние (например, из валентной зоны в зону проводимости). При этом первичным процессом является поглощение фотона (собственное, решеточное, примесное, экситонное, поглощение свободными носителями заряда). Однако не все механизмы поглощения в одинаковой мере приводят к изменению электрических свойств кристаллов.

Из указанных процессов поглощения только собственное и примесное поглощения приводят непосредственно к изменению концентрации свободных носителей заряда, так как они обусловлены переходами электронов (дырок) под действием квантов света из основного состояния в свободное. Именно эти процессы поглощения дают наибольший вклад в фотоэффект и называются фотоэлектрически активными.

Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик неоднородной полупроводниковой структуры, а также оптических свойств ФЭП, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость. Она обусловлена явлениями внутреннего фотоэффекта в полупроводниках при облучении их солнечным светом.

Основные необратимые потери энергии в ФЭП вызваны:

- отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя;
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нём;
- рассеянием на тепловых колебаниях решётки избыточной энергии фотонов;
- рекомбинацией образовавшихся фотопар в ФЭП;
- внутренним сопротивлением преобразователя.

Рассмотрим основные виды солнечных элементов, в зависимости способа изготовления.

Солнечные элементы из монокристаллического кремния

Монокристаллические элементы имеют наивысшую эффективность преобразования энергии. Изготавливается путем обработки чистого кристаллического кремния с низкой плотностью дислокаций.

Солнечные элементы из поликристаллического кремния

Изготавливаются путем контролируемой объемной кристаллизации. Внутри кристалла поликристаллического кремния имеются области, отделенные зернистыми границами, вызывающие меньшую эффективность элементов.

Солнечные элементы из аморфного кремния

Аморфный кремний получают путем осаждения тонкой пленки кремния на несущий материал. Эта технология имеет ряд преимуществ:




- процесс производства солнечных панелей на основе аморфного кремния относительно простой и недорогой;
- возможно производство элементов большой площади;
- низкое энергопотребление.

Недостатки технологии:

- эффективность преобразования значительно ниже, чем в кристаллических элементах;
- элементы подвержены процессу деградации.

Внешний вид и характеристики ФЭП различного типа приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики	Тип фотоэлектрического преобразователя		
	монокристаллический	поликристаллический	аморфный
внешний вид			
коэффициент полезного действия (КПД), %	14...20	до 18	6...10

Солнечная батарея – несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей – полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток.

Кристаллический модуль (солнечная батарея) состоит из нескольких отдельных солнечных элементов, практически всегда соединённых последовательно, что позволяет увеличить напряжение и выходную мощность по сравнению с одним солнечным элементом. Обычно напряжение модуля проектируется так, чтобы оно соответствовало напряжению батареи 12 В. Напряжение отдельного солнечного элемента при 25 °С и атмосферной массе 1,5 составляет около 0,6 В. Принимая во внимание то, что производительность солнечных элементов уменьшается при увеличении температуры, а для зарядки аккумулятора требуется напряжение порядка 15 В, большинство модулей включают в себя 36 элементов, соединённых последовательно. Такой модуль вырабатывает напряжение 21 В при стандартных условиях тестирования и имеет рабочее напряжение равное $17 \div 18$ В при максимальной мощности и температуре. Избыточное напряжение необходимо, чтобы компенсировать падение напряжения на других элементах фотоэлектрической системы и работу не в точке максимальной мощности вследствие уменьшения интенсивности излучения. Устройство солнечной батареи показано на рисунках 1, 2.

Плотность упаковки солнечных элементов в модуле равна отношению площади модуля, которую занимают солнечные элементы, к общей площади. Плотность упаковки наряду с рабочей температурой и КПД ФЭП является фактором, определяющим выходную мощность батареи. Плотность упаковки зависит от формы используемых солнечных элементов.

Например, монокристаллические элементы бывают круглыми или полукруглыми, поликристаллические элементы обычно квадратные. Следовательно, плотность упаковки монокристаллических элементов ниже, чем поликристаллических. Возможные варианты упаковки круглых и квадратных элементов показаны в таблице 2.

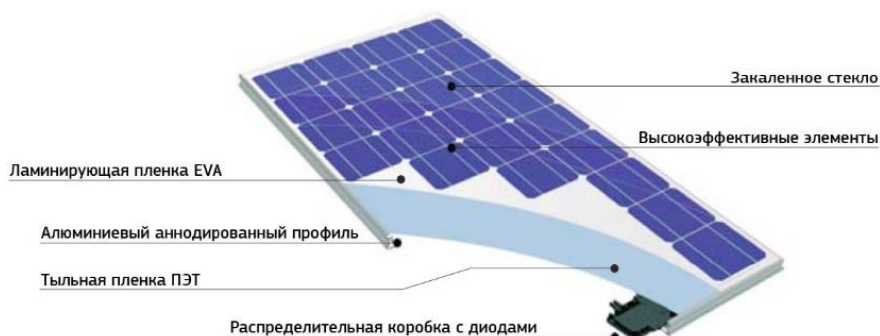


Рисунок 1. – Устройство солнечной батареи

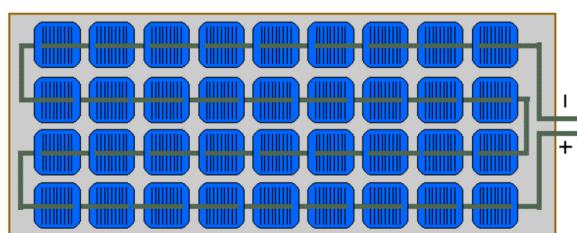


Рисунок 2. – Соединение элементов

Таблица 2

монокристаллические круглые	монокристаллические обточенные	поликристаллические

Если между элементами специально оставить зазоры и заднюю поверхность сделать из белого материала, то можно увеличить выходную мощность за счет эффекта концентрации излучения. Определенное количество света, попадающего в области между солнечными элементами и проводкой, рассеивается и направляется в активные области модуля.

Плотность упаковки поликристаллических солнечных элементов в модуле больше, но они вырабатывают меньшую мощность, так как их эффективность ниже.

Спектр солнечного излучения, основные параметры излучения

При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется за счет поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения озоном и рассеяния излучения молекулами газов и частицами. Параметр, отражающий влияние атмосферы на солнечное излучение, достигающее до земной поверхности, – атмосферная масса (или воздушная масса). Атмосферная масса – это длина пути, который проходит свет через атмосферу, отнесенная к кратчайшему возможному пути (Солнце находится в зените). Атмосферная масса показывает, на сколько уменьшилась спектральная плотность потока излучения после прохождения через атмосферу и поглощения воздухом и пылью.

Соотношение для вычисления номера атмосферной массы, АМ, (применяется для ясной погоды и не учитывает атмосферное давление) находят по формуле

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}, \quad (1)$$

где θ – угол между нормалью к земной поверхности и солнечными лучами (зенитный угол).

Спектр солнечного излучения может быть аппроксимирован спектром излучения абсолютно черного тела при температуре 5762 К (рисунок 3).

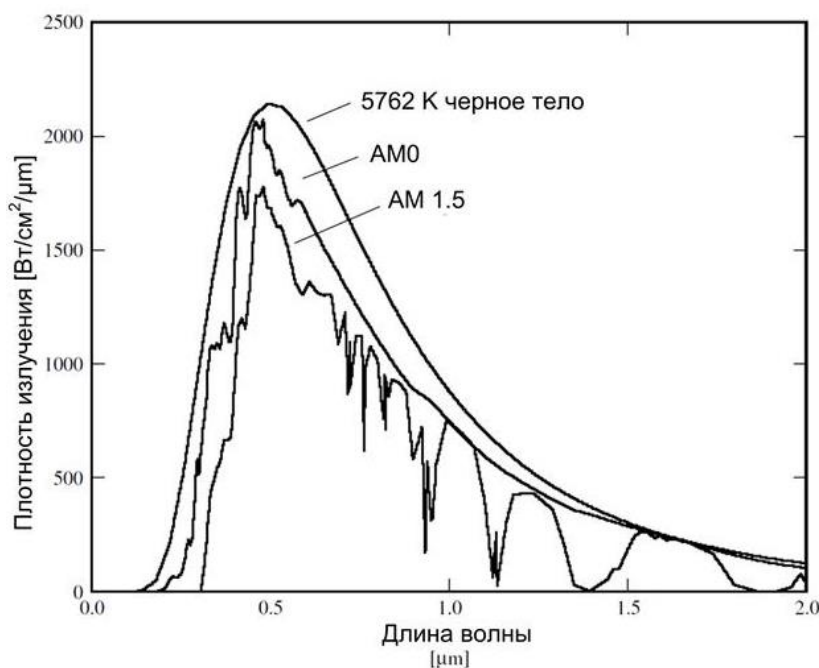


Рисунок 3

Через параметр атмосферной массы может быть определена интенсивность солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлектрического преобразователя. Различают интенсивность прямой составляющей и общую интенсивность.

Интенсивность прямой составляющей солнечного излучения

$$I_D = 1353 \cdot 0,7^a, \quad (2)$$

где $a = AM^{0,678}$.

Общая интенсивность солнечного излучения

$$I_G = 1,1 \cdot I_D. \quad (3)$$

Общая интенсивность включает прямую и диффузную составляющие. На практике величина диффузной составляющей принимается равной 10% от прямой. В зависимости от состава излучения спектры по AM могут иметь обозначение D (direct) и G (global).

Стандартный спектр на поверхности Земли соответствует атмосферной массе AM1,5 (AM1,5G). Рассчитав по (2) и (3) интенсивность для AM1,5G получим 931 Вт/м². На практике стандартом определено значение интенсивности (нормализованная суммарная плотность излучения), равное 1 кВт/м². Стандартный спектр вне земной атмосферы соответствует AM0, так как свет не ослабляется атмосферой. Этот спектр используют для расчета солнечных элементов орбитальных аппаратов. Для наиболее часто встречающихся номеров AM в таблице 3 приведены расчетные и стандартные значения интенсивности солнечного излучения.

Таблица 3

	Метод	Спектр				
		AM0	AM1	AM1,5	AM2	AM10
Интенсивность, Вт/м ²	ID	1353	974	846	765	247
	IG	1488	1042	931	841	272
	стандарт	1350		1000		

Описание стенда для проведения измерений

На панели стенда смонтировано 4 солнечных батареи (**BL1 ... BL4**). Каждая батарея представляет собой 10 параллельно соединенных солнечных элементов **SS-2515**, как показано на рисунке 4. Характеристики **SS-2515** приведены в таблице 4.



Рисунок 4. – Внешний вид стенда

Таблица 4. – Характеристики солнечных элементов

Характеристика	Ед. изм.	Значение
тип	–	некристаллический
размер	мм	24,7×14,7
под прямыми солнечными лучами (1000 Вт/м ²)		
напряжение холостого хода	В	6,0
ток короткого замыкания	мА	4,0
при комнатном освещении		
рабочее напряжение	В	4,2
рабочий ток	мкА	750

Порядок выполнения работы

1. Изучение характеристик солнечного элемента

Подготовка к работе:

1. Разместить установку на рабочем месте.
2. Убрать с панели все переключатели (при их наличии).
3. Включить питание стенда.
4. Разместить источник освещения так, чтобы прожектор был направлен прямо на блок солнечных элементов. Угол наклона стойки – вертикальный, расстояние L от стекла прожектора до поверхности солнечных элементов установить равным 350 мм.
5. Подключить источник освещения к электросети. С помощью регулятора на кабеле питания включить прожектор и проверить регулирование яркости.
6. Выключить прожектор, установив регулировку в положение **OFF**.
7. Выключить питание стенда.

II. Определение характеристик

1. Подготовить установку к работе.
2. Собрать на панели схему как показано на рисунке 5.
3. Включить прожектор на максимальную яркость.
4. Измерить напряжение холостого хода. Данные занести в таблицу 5.

Измерение тока и напряжения производится внешним измерительным прибором, например, мультиметром.

5. Подключить нагрузку к выходу солнечной батареи (рисунок 6).
6. Провести серию опытов постепенно увеличивая нагрузку. Данные занести в таблицу

Величина нагрузки должна определяться для каждого опыта исходя из условий освещенности для получения достаточного количества экспериментальных точек исследуемой характеристики.

7. Провести опыт короткого замыкания (рисунок 7). Данные занести в таблицу 5.

8. Выключить прожектор.

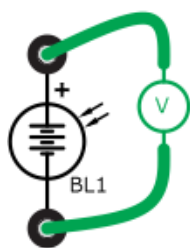


Рисунок 5. – Холостой ход

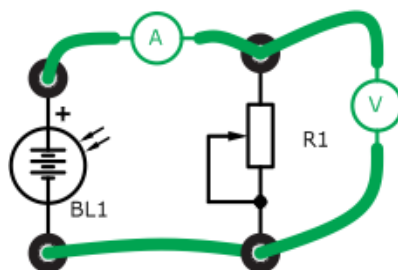


Рисунок 6. – Резистивная нагрузка

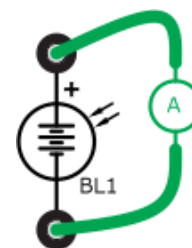


Рисунок 7. – Короткое замыкание

Таблица 5

Нагрузка	Измерено		Вычислено		
	U , В	I , мА	P , мВт	$I\%$	$P\%$
ХХ					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
КЗ					

9. По данным таблицы 5 определить максимальный ток и мощность батареи. Данные занести в таблицу 6.

Таблица 6

Параметры батареи из таблицы 5	Обозначение	Единица измерения	Величина
максимальный ток	I_m	мА	
максимальная мощность	P_m	мВт	

10. Построить следующие характеристики: $I = f(U)$, $P = f(U)$.

11. Построить совмещенную характеристику батареи в относительных единицах: $I\% = f(U)$, $P\% = f(U)$ (рисунок 8).

Относительный ток батареи

$$I\% = \frac{I}{I_m}. \quad (4)$$

Относительная мощность батареи

$$P\% = \frac{P}{P_m}. \quad (5)$$

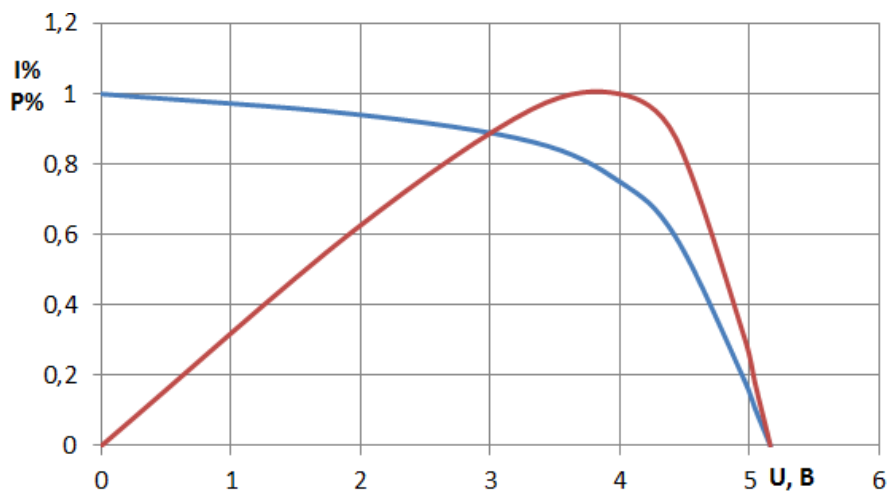


Рисунок 8

12. Повторить (при необходимости) опыты для солнечных батарей с BL2...BL4.

13. Выключить питание. Разобрать схему.

14. Определить (вычислить) характеристики отдельного элемента батареи BL1.

III. Способы соединения солнечных элементов в группы

1. Подготовить установку к работе. Установить расстояние L , равное 350 мм.
2. Собрать на панели схему, как показано на рисунке 9. В качестве нагрузки использовать резистор **R1**.

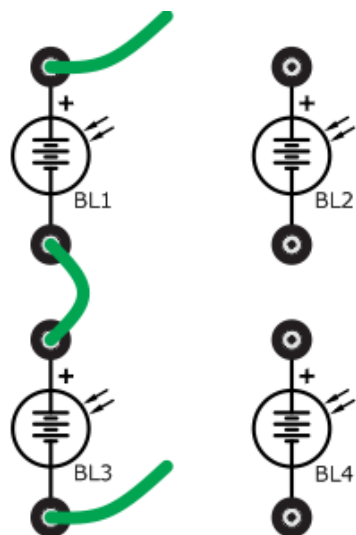


Рисунок 9. – Последовательное соединение двух батарей (BL1 и BL3)

3. Включить прожектор на максимальную яркость.
4. Снять характеристики для случая последовательной работы **BL1** и **BL3**: напряжение холостого хода, работа под нагрузкой и ток короткого замыкания. Данные занести в таблицу 7.

Таблица 7

Нагрузка	Измерено		Вычислено		
	U , В	I , мА	P , мВт	$I\%$	$P\%$
XX					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
K3					

5. Выключить прожектор.
6. Собрать на панели схему как показано на рисунке 10. В качестве нагрузки использовать резистор **R1**.

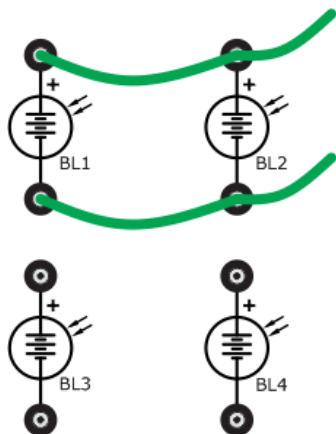


Рисунок 10. – Параллельное соединение 2 батарей (BL1 и BL2)

7. Включить прожектор на максимальную яркость.
8. Снять характеристики для случая параллельной работы **BL1** и **BL2**.

Данные занести в таблицу 8.

Таблица 8

Нагрузка	Измерено		Вычислено
	U	I	P
	В	мА	мВт
ХХ			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
КЗ			

9. Выключить прожектор.
10. Собрать на панели схему как показано на рисунке 11. В качестве нагрузки использовать резистор **R1**.

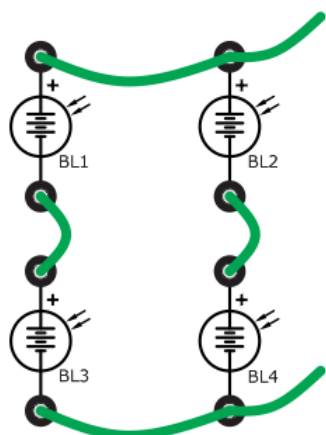


Рисунок 11. – Последовательно-параллельное соединение батарей

11. Включить прожектор на максимальную яркость.
12. Снять характеристики для случая параллельного соединения двух последовательно соединенных батарей (**BL1** последовательно **BL3**, **BL2** последовательно **BL4**). Данные занести в таблицу 9.
13. Выключить прожектор.

Таблица 9

Нагрузка	Измерено		Вычислено		
	U , В	I , мА	P , мВт	$I\%$	$P\%$
ХХ					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
КЗ					

14. На одном графике построить характеристики $I = f(U)$, а также $P = f(U)$ и $P = f(I)$ для данных из таблиц 7...9 (рисунки 12, 13).
15. Выключить питание. Разобрать схему.

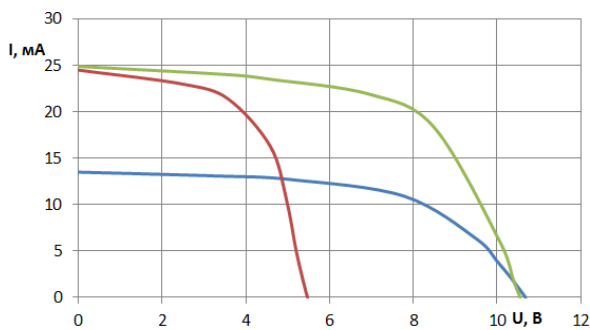


Рисунок 12

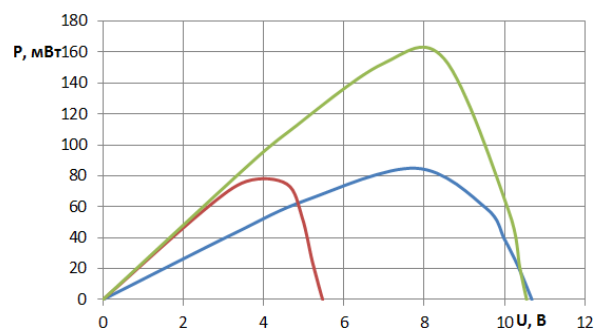


Рисунок 13

IV. Работа солнечной батареи при затенении отдельных модулей

1. Подготовить установку к работе. Установить расстояние L , равное 350 мм.
2. Собрать на панели схему как показано на рисунке 14.
3. Включить прожектор на максимальную яркость.

4. Закрыць от лучей света (затенить) батарею **BL3**. Проследить за изменением яркости светильника **EL1**.

5. Подключить к батареям байпасные диоды, как показано на рисунке 15.

6. Закрыць от лучей света (затенить) батарею **BL3**. Проследить за изменением яркости светильника **EL1**.

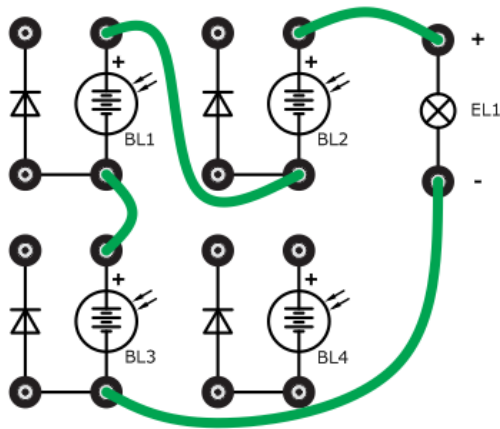


Рисунок 14. – Питание нагрузки при последовательном соединении батарей

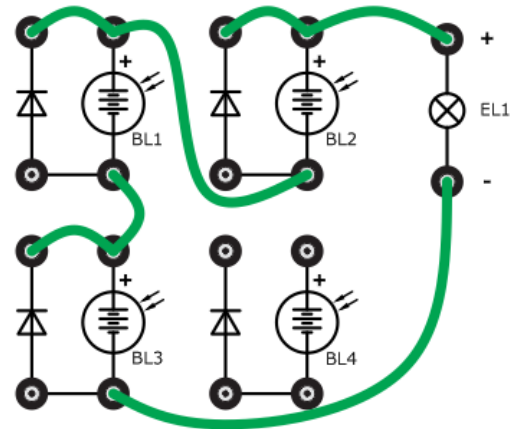
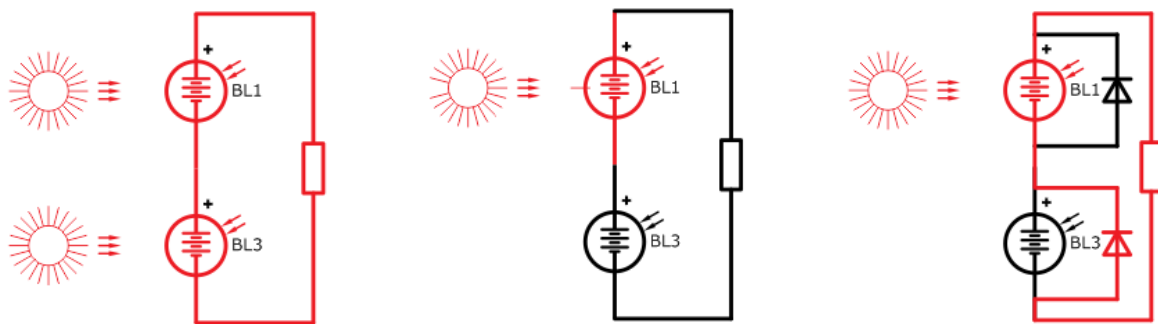


Рисунок 15. – Питание нагрузки при последовательном соединении батарей с применением байпасных диодов

Иллюстрация работы байпасных диодов приведена на рисунке 16.



a

б

в

a – освещены все батареи; *б* – одна батарея затенена; *в* – ток течет через диод

Рисунок 16

V. Энергетические характеристики солнечных батарей

1. Подготовить установку к работе. Расстояние *L* установить равным 350 мм.

2. Включить прожектор на максимальную яркость.

3. Снять характеристики батареи: напряжение холостого хода, работа под нагрузкой и ток короткого замыкания (схемы на рисунках 17...19). Данные занести в таблицу 10.

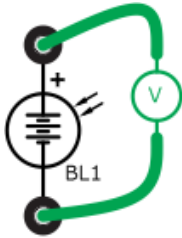


Рисунок 17. – Холостой ход

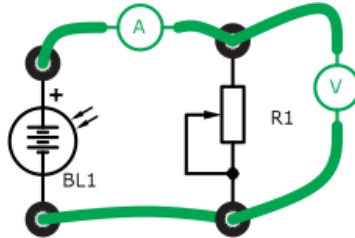


Рисунок 18. – Резистивная нагрузка

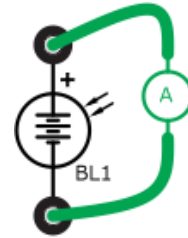


Рисунок 19. – Короткое замыкание

Таблица 10

Нагрузка	Измерено		Вычислено	
	U , В	I , мА	P , мВт	η
ХХ				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
КЗ				

4. Выключить прожектор.
5. По данным таблицы 10 определить максимальный ток и мощность батареи. Данные занести в таблицу 12.
6. Рассчитать номинальную мощность (7) и КПД (8). Данные занести в таблицу 12.
7. По таблице 11 определить плотность облучения. Данные занести в таблицу 12.

Таблица 11

Расстояние L , мм	Плотность облучения I_p , Вт/м ²
400	500
350	650
300	830
250	1190
200	1730
150	2200

8. Для всех строк в таблице 10 рассчитать P и η .
9. Построить характеристику $\eta = f(U)$.
10. При необходимости повторить опыт для другого расстояния L .
11. Выключить питание. Разобрать схему.

Таблица 12

Параметры батареи из таблицы 10	Обозначение	Ед. изм.	Величина
Максимальный ток	I_m	А	
Максимальная мощность	P_m	Вт	
Плотность облучения*	I_p	Вт/м ²	
Максимальный КПД по (8)	η_m	–	
Номинальная мощность по (7)	P_n	Вт	

КПД солнечной батареи в зависимости от мощности

$$\eta = \eta_m \cdot \frac{P}{P_m}. \quad (6)$$

При известной паспортной мощности и размерах батареи максимальный КПД можно определить по формуле (8). Плотность облучения (Вт/м²) связана с выходной мощностью по формуле (7).

Расчетная номинальная (паспортная) мощность батареи, Вт,

$$P_n = \frac{I_{G(AM1,5)}}{I_p} \cdot P_m, \quad (7)$$

где P_m – максимальная мощность;

I_G – суммарная плотность излучения, для атмосферной массы AM1,5 равная 1 кВт/м²;

I_p – плотность облучения, Вт/м².

Данные по плотности облучения, замеренные при максимальной яркости прожектора в зависимости от расстояния L приведены в таблице 12.

Расчетный максимальный КПД

$$\eta_m = \frac{P_n}{S \cdot I_{G(AM1,5)}}, \quad (8)$$

где S – площадь фотоэлементов солнечной батареи или габаритная площадь, м²:

$$S = n \cdot A \cdot B, \quad (9)$$

где n – количество модулей в батарее;
 A – длина модуля, м;
 B – ширина модуля, м.

Таблица 13. – Данные батарей

Параметр	Единица измерения	Значение
Длина модуля	мм	24,7
Ширина модуля	мм	14,7
Количество модулей в батарее	шт.	10
Площадь батареи	м ²	0,00363

VI. Характеристики солнечных батарей в зависимости от интенсивности облучения, угла падения лучей и температуры

Температурная чувствительность напряжения холостого хода

1. Подготовить установку к работе. Расстояние L установить равным 200 мм.
2. Собрать на панели схему как показано на рисунке 20.

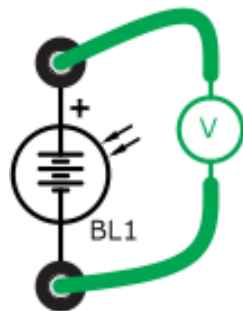


Рисунок 20

3. Перед началом опыта температура батарей не должна превышать 25 °С.

Измерение температуры производится внешним измерительным прибором, например мультиметром.

4. Занести в таблицу 14 значение начальной температуры.
5. Включить прожектор на максимальную яркость.
6. По мере роста температуры снять зависимость $U_{xx} = f(t)$ с интервалом 5 °С. Данные занести в таблицу 14.
7. Выключить прожектор.

При работе прожекторов солнечные батареи могут нагреваться до высоких температур. Следует учитывать, что максимальная температура работы солнечных батарей не должна превышать 80 °С.

Таблица 14

Температура, t , °C	Напряжение, U_{xx} , В

8. Построить зависимость $U_{xx} = f(t)$ (рисунок 21).

9. На графике выбрать относительно прямолинейный участок между двумя точками.

10. Рассчитать коэффициент зависимости напряжения холостого хода от температуры по (10).

Зависимость напряжения холостого хода от температуры (В/°C)

$$V_{O(t)} = \frac{U_{xx2} - U_{xx1}}{t_2 - t_1}, \quad (10)$$

где U_{xx1} – напряжение холостого хода в начальной точке, В;
 U_{xx2} – напряжение холостого хода в конечной точке, В;
 t_1 – средняя температура батареи в начальной точке, °C;
 t_2 – средняя температура батареи в конечной точке, °C.

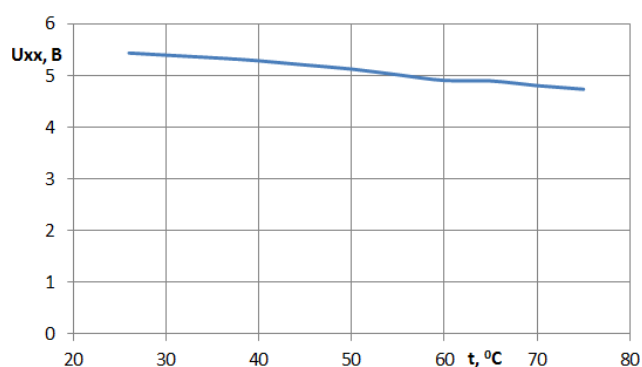


Рисунок 21

VII. Вольт-амперные характеристики солнечных батарей в зависимости от угла падения лучей

1. Подготовить установку к работе. Расстояние L установить равным 350 мм.

2. Включить прожектор на максимальную яркость.

3. Снять характеристики батареи: напряжение холостого хода, работа под нагрузкой и ток короткого замыкания (схемы на рисунках 22...24). Данные занести в таблицу 15.

4. Установить угол стойки прожектора равным 20° .

5. Повторить пункт 3.

6. Повторить пункты 4, 5 для угла наклона прожектора 40° .

7. Выключить прожектор.

8. На одном графике построить характеристики $I = f(U)$ для данных из таблицы 15 (рисунок 25).

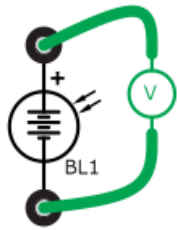


Рисунок 22. – Холостой ход

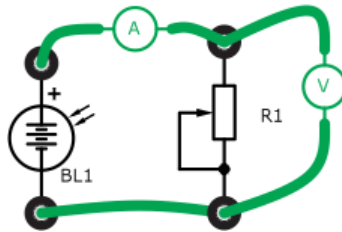


Рисунок 23. – Резистивная нагрузка

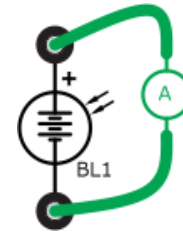


Рисунок 24. – Короткое замыкание

Таблица 15

Нагрузка	Угол наклона лучей					
	0°		20°		40°	
	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$
ХХ		0		0		0
1	4,9					
2	4,5		4,5		4,5	
3	3,5		3,5		3,5	
4	3		3		3	
5	2		2		2	
КЗ	0		0		0	

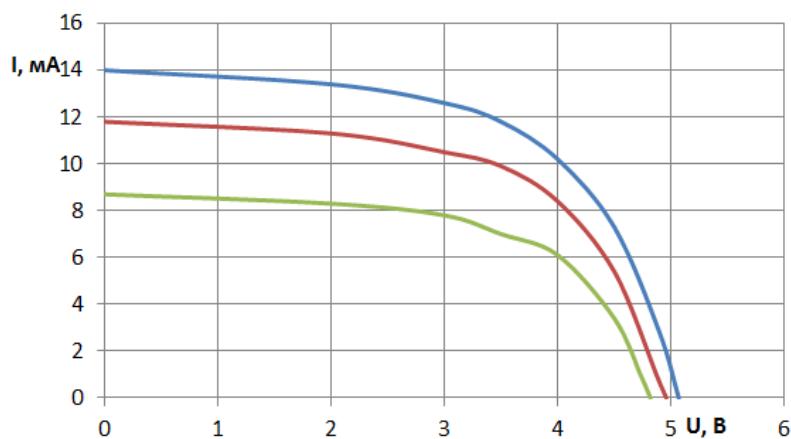


Рисунок 25

VIII. Вольт-амперные характеристики солнечных батарей в зависимости от интенсивности облучения

1. Подготовить установку к работе. Расстояние L установить равным 400 мм.
2. Включить прожектор на максимальную яркость.
3. Снять характеристики батареи (схемы на рисунках 22...24). Данные занести в таблицу 16.
4. Расстояние L установить равным 300 мм.
5. Повторить пункт 4.
6. Расстояние L установить равным 200 мм.
7. Повторить пункт 4.
8. Выключить прожектор.
9. На одном графике построить характеристики $I = f(U)$ для данных из таблицы 16 (рисунок 6).
10. Выключить питание. Разобрать схему.

Таблица 16

Нагрузка	Расстояние, мм					
	$L_1 = 400$		$L_2 = 300$		$L_3 = 200$	
	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$
ХХ		0		0		0
1	4,9		4,9		4,9	
2	4,5		4,5		4,5	
3	3,5		3,5		3,5	
5	3		3		3	
8	2		2		2	
КЗ	0		0		0	

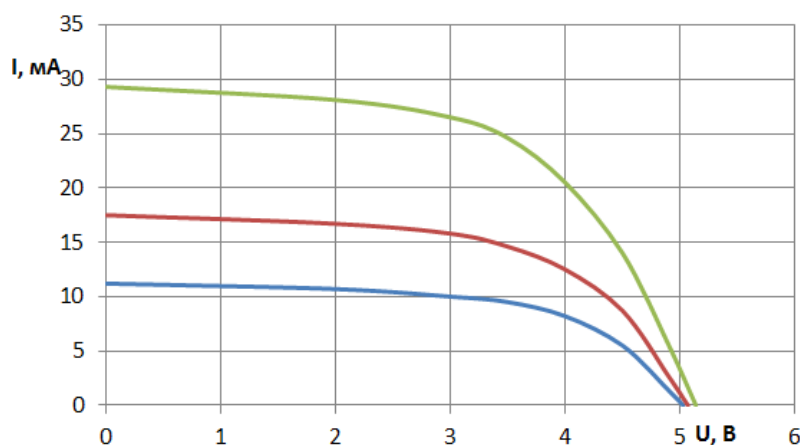


Рисунок 26

IX. Солнечная аккумуляторная батарея

1. Подготовить установку к работе.
2. Собрать на панели схему как показано на рисунке 27. Для зарядки аккумулятора (АКБ) требуется чтобы напряжение источника было выше напряжения АКБ. На данном стенде для заряда следует использовать последовательно-параллельное соединение солнечных батарей.

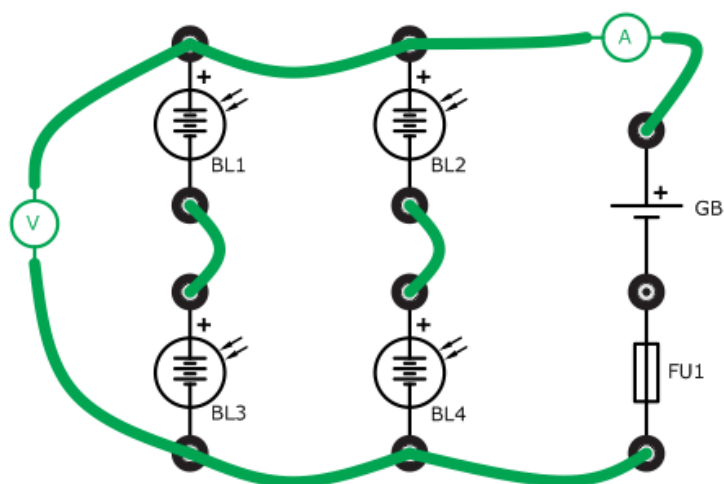


Рисунок 27. – Схема зарядки АКБ от солнечной батареи

При сильном разряде АКБ ее следует зарядить от источника UG.

3. Установить расстояние L равным 200 мм.
4. Включить прожектор на максимальную яркость.
5. Изменяя яркость прожектора с помощью регулятора определить зависимость напряжения на клеммах АКБ и зарядный ток. Данные занести в таблицу 17.

Таблица 17

Яркость	Измерено	
	$U, В$	$I, мА$
1		
2		
3		
4		
5		

6. Выключить прожектор.
7. Собрать на панели схему как показано на рисунке 28.

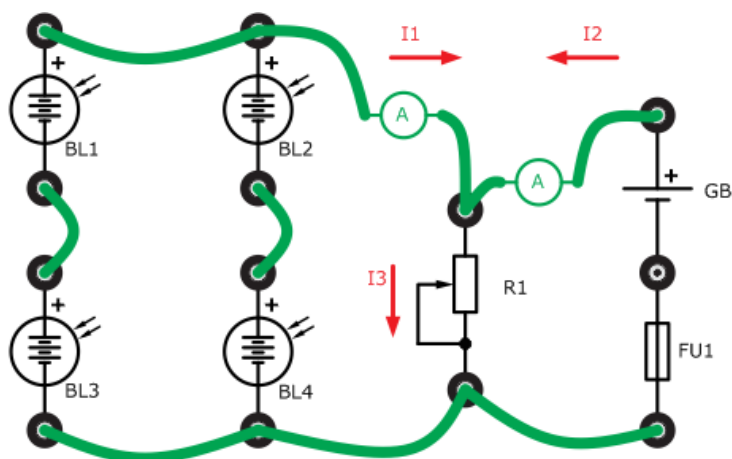


Рисунок 28. – Схема совместной работы АКБ и солнечной батареи на нагрузку

Измерение токов производится внешними измерительными приборами, например мультиметрами.

8. Включить прожектор на максимальную яркость.
9. Замерить токи I_1 и I_2 при плавном увеличении нагрузки. Нагрузка изменяется от минимума резистором **R1**. Данные занести в таблицу 18.
10. По (11) вычислить ток I_3 . Данные занести в таблицу 18.

Таблица 18

Нагрузка	Измерено		Вычислено
	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА
1			
2			
3			
4			
5			

11. Не изменяя величину нагрузки, снижать яркость прожектора до минимума. При этом замерить токи I_1 и I_2 . Данные занести в таблицу 19.
12. Выключить прожектор.
13. Вычислить ток I_3 . Данные занести в таблицу 19.

Таблица 19

Яркость	Измерено		Вычислено
	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА
1			
2			
3			
4			

Ток в нагрузке

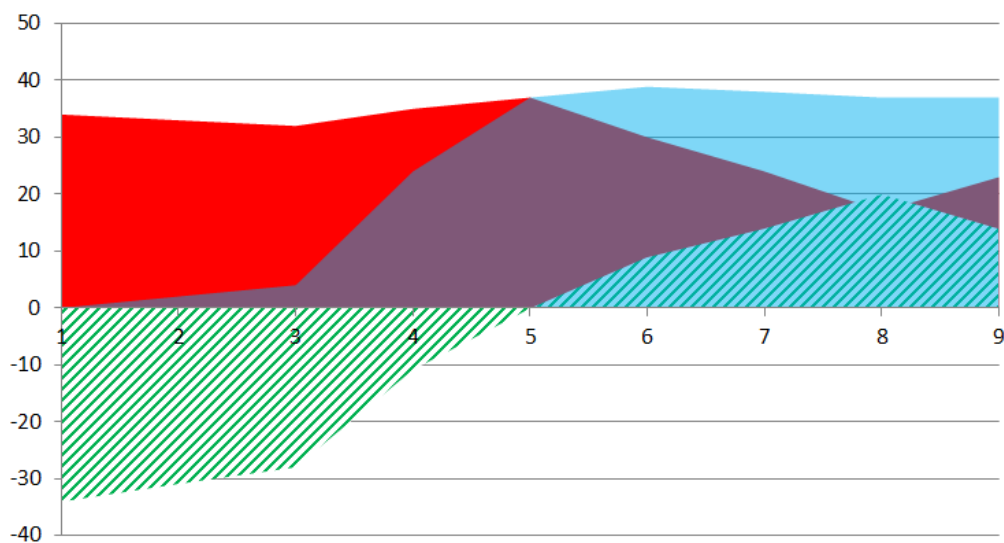
$$I_3 = I_1 + I_2, \quad (11)$$

где I_1 – ток, генерируемый солнечной батареей, А;

I_2 – ток, отдаваемый АКБ (при зарядке АКБ ток отрицателен), А.

14. Выключить питание. Разобрать схему.

15. Построить диаграмму работы солнечной установки с аккумулятором (рисунок 29). Для этого на одном графике построить зависимости $I_1 = f(R)$, $I_2 = f(R)$, $I_3 = f(R)$, $I_1 = f(I_p)$, $I_2 = f(I_p)$, $I_3 = f(I_p)$.



красный – I_1 ; зеленый – I_2 ; синий – I_3

Рисунок 29. – Диаграмма работы солнечной установки с аккумулятором

При отсутствии потребления и высокой генерируемой мощности вся энергия запасается в АКБ. По мере роста потребления в нагрузке зарядный ток падает. По мере снижения интенсивности облучения (I_p) АКБ расходует энергию для питания нагрузки.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические схемы для измерений.
3. Результаты измерений.
4. Расчет параметров, графики.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какой прибор называют фотоэлектрическим преобразователем?
2. В чем заключается внешний фотоэффект?
3. В чем заключается внутренний фотоэффект?
4. Чем вызваны необратимые потери энергии в ФЭП?
5. Основные виды солнечных элементов, в зависимости от способа изготовления.
6. Устройство и основные характеристики кристаллического модуля (солнечной батареи).

Литература

1. Материаловедение : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2015. – 557 с.
2. Федотов, А. К. Физическое материаловедение : учеб. пособие : в 3 ч. / Федотов, А. К. – Минск : Выш. шк., 2015. – Ч. 3 : Материалы энергетики и энергосбережения / А. К. Федотов, В. М. Анищик, М. С. Тиванов. – 463 с.
3. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учеб. / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2021. – 448 с.
4. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2006. – 521 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование электрической прочности твердых диэлектриков

Цель работы: измерение электрической прочности твердых диэлектрических материалов на переменном токе (частота 50 Гц); исследование зависимости электрической прочности от состава, строения и толщины плоских диэлектрических образцов, числа слоев материала, формы электродов.

Краткие теоретические сведения

Одной из важнейших характеристик электротехнических материалов является напряжение пробоя. Это минимальное напряжение, приложенное к диэлектрику, приводящее к образованию в нем проводящего канала. За напряжение пробоя принимают такое напряжение, при котором $\frac{dI}{dU} = \infty$, т.е. дифференциальная проводимость материала становится бесконечно большой (рисунок 1).

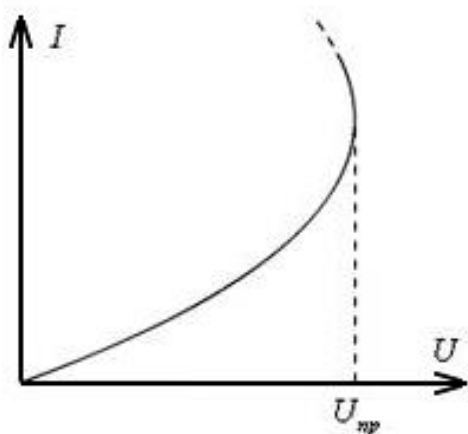


Рисунок 1. – Вольт-амперная характеристика электрической изоляции

Механизм пробоя твердого диэлектрика заключается в разрыве химических связей в веществе под действием внешнего электрического поля, что приводит к разрушению диэлектрика с потерей им электроизоляционных свойств. Это говорит о взаимосвязи между электрической прочностью твердого диэлектрика и энергией его химических связей.

Значение напряжения пробоя $U_{пр}$ зависит от различных параметров: толщины диэлектрика h ; формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и самого диэлектрика; температуры диэлектрика. Следовательно, оно характеризует не столько свойства самого материала, сколько

способность конкретного изделия противостоять сильному электрическому полю. Для сравнения свойств материалов, из которых изготовлены изоляционные изделия, удобной характеристикой является электрическая прочность $E_{пр}$.

Электрической прочностью называют минимальную напряженность однородного электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика:

$$E_{пр} = U_{пр} / h.$$

Типичный вид зависимости электрической прочности твердого диэлектрика от толщины материала приведен на рисунке 2.

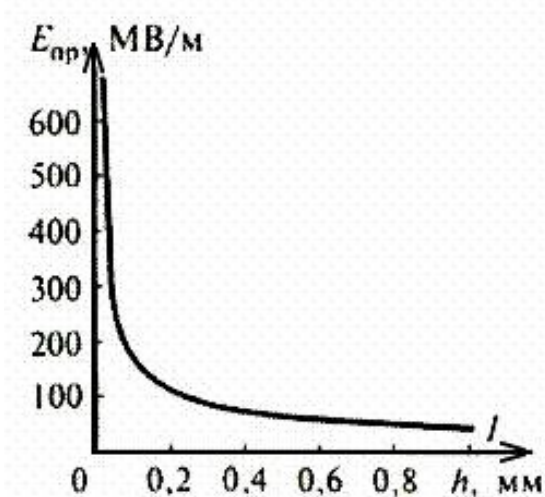


Рисунок 2. – Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от толщины материала

В большинстве случаев напряжение пробоя с увеличением толщины изоляции возрастает медленнее, чем по линейному закону. При этом в тонких слоях диэлектрика значительное влияние оказывают неоднородности структуры, уменьшая электрическую прочность. У неоднородных тонких материалов (бумага, лакоткань и т.п.) электрическая прочность уменьшается с увеличением площади электродов, что объясняется увеличением вероятности нахождения дефектов структуры таких диэлектриков.

Для надежной работы электротехнического устройства рабочее напряжение его изоляции $U_{раб}$ должно быть меньше пробивного напряжения с коэффициентом, большим чем коэффициент запаса ($U_{пр} / U_{раб}$ – коэффициент запаса электрической прочности изоляции).

Электрическая прочность некоторых диэлектриков и электроизоляционных материалов приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Электрическая прочность твердых диэлектриков

Наименование диэлектрика	$E_{пр}$, МВ/м
Асботекстолит	1,0–1,5
Лавсан	80–120
Полистирол	25–40
Полиуретан	20–25
Полиэтилен	30–55
Текстолит	2,2–25
Электрофарфор	20–30
Универсальная лента ПВХ	36,7
Трубка термоусаживаемая	15
Резина кремнийорганическая	15–40

Различают несколько видов пробоя: чисто электрический, тепловой, электромеханический, электрохимический и ионизационный.

Электрический пробой твердых диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием. Он протекает за время не более $10^{-7} \div 10^{-8}$ с, не обусловлен тепловой энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени зависит от температуры, и сопровождается в своей начальной стадии разрушением диэлектрика в очень узком канале. Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Развитие лавин сопровождается фотоионизацией (как в газах), которая ускоряет образование проводящего канала. Ускоренные полем электроны при столкновениях передают свою энергию узлам решетки и разогревают её вплоть до плавления. В разрядном канале создается значительное давление, которое может привести к появлению трещин или полному разрушению изолятора. Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. В неоднородных электрических полях пробивное напряжение однородного диэлектрика меньше, чем в однородных.

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее критического значения, когда наблюдается заметное снижение электрической прочности. На рисунке 3 представлена зависимость электрической прочности от температуры диэлектрика при электрическом и тепловом пробое.

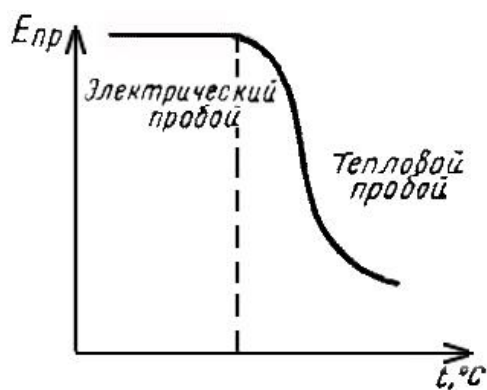


Рисунок 3. – Зависимость электрической прочности от температуры диэлектрика при электрическом и тепловом пробое

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике за счёт диэлектрических потерь, превышает то количество энергии, которое может рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие, а процесс приобретает лавинообразный характер. В случае наступления теплового пробоя, который связан с нагревом изоляции в электрическом поле, процесс идет следующим образом: после подачи напряжения на диэлектрик в нем начинает выделяться теплота потерь, и он нагревается до некоторой критической температуры. С ростом температуры растет число носителей, растет проводимость, угол потерь возрастает, в связи с этим температура повышается еще больше. В конце концов, в диэлектрике происходят существенные изменения (расплавление, обугливание и т.п. в зависимости от природы материала), и его собственная электрическая прочность снижается настолько, что происходит пробой. Пробой происходит при напряженности более низкой, нежели без разогрева, то есть если бы пробой был чисто электрическим.

Тепловой пробой может иметь локальный характер, при котором средняя температура всего объема изолятора существенно не изменяется. Таким образом, тепловой пробой существенно зависит от интенсивности рассеяния выделяющегося в диэлектрике тепла в окружающую среду, поэтому электрическая прочность при тепловом пробое является не только характеристикой материала, но и определяется формой и другими параметрами самого изделия. Напряжение пробоя при тепловом пробое требует значительного времени на разогрев диэлектрика (рисунок 4).

С ростом частоты электрического напряжения и ростом окружающей температуры пробивное напряжение уменьшается. Зависимость, представленную на рисунке 4, часто называют кривой жизни диэлектрика, так как по ней можно определить время жизни диэлектрика при заданной напряженности электрического поля.

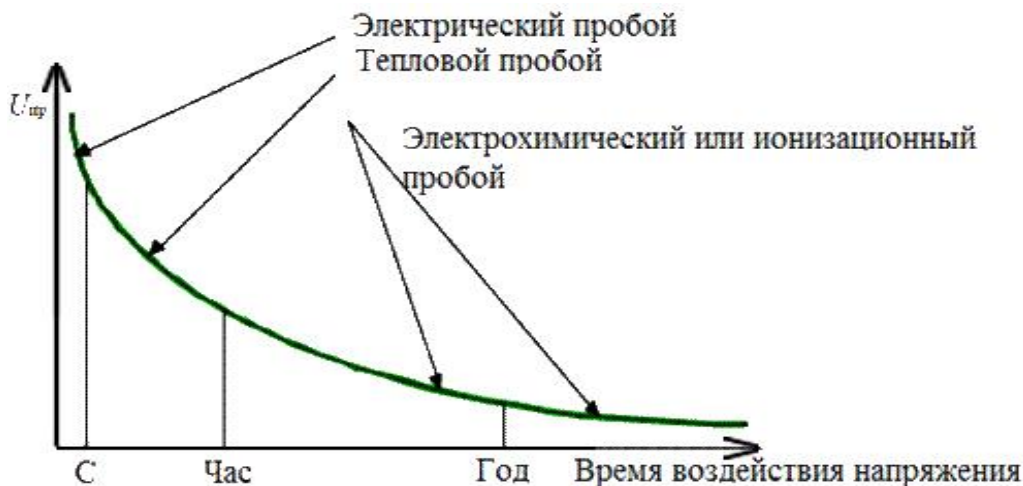


Рисунок 4. – Кривая жизни диэлектрика

Электромеханический пробой подготавливается механическим разрушением материала (образованием макроскопических трещин) силами электрического поля (давлением электродов).

Электрохимический пробой связан с химическим изменением материала в электрическом поле, например, металлизацией материала в результате электролиза. Этот вид пробоя возникает при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала (например, в керамике) происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением оксидов металлов переменной валентности. Развитие электрохимического пробоя требует наибольшего времени из всех рассмотренных видов пробоя (см. рисунок 4), поскольку он связан с изменением электропроводности диэлектрика в процессе его эксплуатации под воздействием внешних факторов.

Разновидностью теплового пробоя можно считать ионизационный пробой. Он характерен для твёрдых пористых диэлектриков и обусловлен ионизацией газа в порах. За счёт ионизационных потерь разогревается поверхность закрытых пор, возникают локальные перепады температуры в диэлектрике и связанные с ними термомеханические напряжения. Такие процессы особенно опасны в хрупких материалах, поскольку термомеханические напряжения могут превзойти предел прочности материала и вызвать растрескивание диэлектрика. Ионизационный пробой объясняется действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частичных разрядах, а также эрозией диэлектрика ионами газа на границе пор.

Величина электрической прочности зависит от характера электрического поля. В однородном электрическом поле $E_{пр}$ имеет постоянную величину. Однородное поле можно получить:

- между плоскими электродами с закругленными краями (рисунок 5, а);
- между шарами большого диаметра при малом расстоянии между ними (рисунок 5, б).

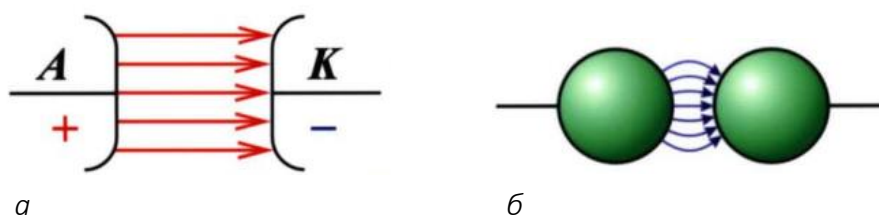


Рисунок 5. – Способы получения однородного электрического поля

Неоднородное поле возникает:

- между двумя остриями (рисунок 6, а);
- между острием и плоскостью (рисунок 6, б).



Рисунок 6. – Способы получения неоднородного электрического поля

Особенность пробоя газа в неоднородном поле – возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напряженность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения.

В случае несимметричных электродов игла – плоскость и *положительной полярности на игле* пробой происходит при *меньшем* напряжении (рисунок 7), чем при обратной полярности.

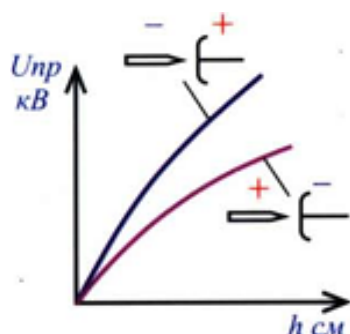


Рисунок 7. – Зависимость пробивного напряжения от полярности электродов в неоднородном электрическом поле

Ионизация газа при любой полярности на электродах происходит в районе иглы, где существуют наибольшие напряженности электрического поля. В результате ионизации образуются электроны и ионы, причем электроны быстро нейтрализуются на аноде, а вблизи иглы остаются малоподвижные положительно заряженные ионы. «Облако» объемного заряда изменяет первоначальное распределение потенциала. При положительной полярности на игле (рисунок 8, а) объемный заряд ослабляет напряженность поля вблизи иглы и, наоборот, усиливает ее в неионизированной области. Создаются благоприятные условия для дальнейшей ионизации газа, т.е. дальнейшего прорастания объемного заряда в направлении к катоду. В рассматриваемом случае объемный заряд фактически является продолжением иглы и сокращает эффективную длину разрядного промежутка.

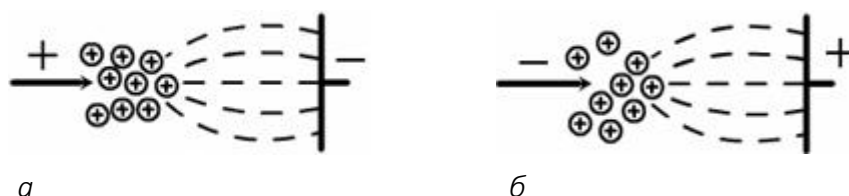


Рисунок 8. – Особенности объемного заряда в несимметричном электрическом поле

При *отрицательной полярности на игле* облако положительного заряда уменьшает напряженность поля в неионизированной области. Поэтому дальнейшая ионизация газа возможна лишь при более *высоком* напряжении на электродах. Таким образом, в данном случае объемный положительный заряд играет роль экрана, сглаживающего максимальные неоднородности поля в разрядном промежутке.

Описание стенда для проведения измерений

Лабораторный стенд состоит из двух блоков: измерительного устройства и высоковольтного устройства, соединенных между собой кабелями.

На передней панели измерительного устройства (рисунок 9) расположены кнопка включения высокого напряжения 1, регулятор напряжения грубый 2 и регулятор точной подстройки напряжения 3, а также цифровой индикатор выходного напряжения 4.

На задней панели измерительного блока расположены кнопка включения питания и соединительные шнуры к высоковольтному устройству.

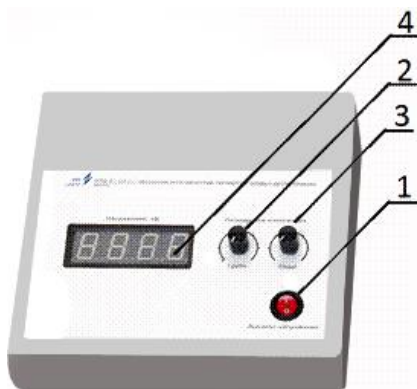


Рисунок 9. – Измерительное устройство

Исследуемый образец размещается на неподвижном плоском электроде 1 высоковольтного блока (рисунок 10), на который подается положительный испытательный потенциал. Сверху фиксируется одним из подвижных (сменных) электродов 2, расположенных на механизме револьверного типа 3. На механизме закреплены испытательные электроды четырех типов-размеров, которые меняются посредством вращения. Эти электроды стержня электрически соединены с корпусом (общим проводом) высоковольтного блока. Механизм смены электродов жестко закреплен на штоке 4 микрометра часового типа 5, что позволяет измерить толщину образца при его креплении в установке.

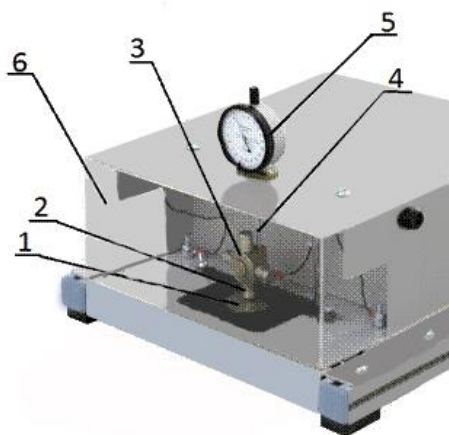


Рисунок 10. – Высоковольтное устройство

Внутри рабочей области расположено устройство крепления испытуемого образца, которое состоит из прижимной планки и прижимных винтов. Рабочая область высоковольтного блока закрывается прозрачной защитной крышкой 6, снабженной концевыми выключателями, что препятствует проведению измерений с открытой крышкой.

Подготовка установки к работе заключается в следующем:

1. Установку необходимо разместить на ровной, прочной, устойчивой, не токопроводящей горизонтальной поверхности.

2. Соединить измерительный и высоковольтный блоки.
3. Перевести регуляторы напряжения 2 и 3 (рисунок 9) в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению.
4. На подвижном стержне 4 измерительной головки высоковольтного блока выбрать нужный электрод 2 путем вращения механизма 3.
5. Отпустить выбранный электрод до касания нижнего неподвижного электрода 1.
6. Произвести установку «0» головки измерительного блока путем вращения индикационного кольца.
7. Включить шнур питания в сеть 50 Гц, 220 В, перевести сетевой выключатель измерительного блока в положение «Включено». При этом должен светиться индикатор выходного напряжения 4 (рисунок 9) и показывать нулевые значения всех трех цифровых разрядов.
8. Проверить работу блокировки высоковольтного блока защитным щитком, для чего поднять вверх защитный щиток. При этом индикаторы выходного напряжения высоковольтного блока должны погаснуть. Опустить вниз защитный щиток – индикаторы высоковольтного блока должны засветиться.
9. Подготовить образцы для испытания таким образом, чтобы расстояние между точкой пробоя и краем образца или соседними точками пробоя было не менее 40 мм. Для исследования зависимости напряжения пробоя от толщины образца подготовить образцы одного материала разной толщины. Для исследования зависимости напряжения пробоя от количества слоев диэлектрика рекомендуется использовать образцы из канцелярского скотча, склеенные в 1–10 слоев.

Порядок выполнения работы

1. *Экспериментальное изучение электрической прочности диэлектриков.*
 1. Выполните подготовку установки к работе.
 2. Поднимите защитный щиток высоковольтного блока.
 3. Поднимите прижимную планку устройства крепления образца.
 4. Подведите между подвижным и неподвижным электродом измерительного блока испытуемый образец.
 5. Зафиксируйте образец прижимной планкой.
 6. Закройте защитный щиток высоковольтного устройства.

7. Запишите в таблицу 2 значение толщины образца по показаниям индикатора измерительной головки (можно измерить толщину материала микрометром).

Таблица 2

Материал	№ опыта	h , мм	$U_{\text{пр}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, МВ/м	$\Delta E_{\text{пр}}$, МВ/м
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				

8. Включите питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока.

9. Нажмите кнопку **«Высокое напряжение»** измерительного блока.

10. Плавно регулируя напряжение ручками на измерительном блоке, добейтесь пробоя диэлектрика. В момент пробоя показания индикатора напряжения обнулятся. Последние зафиксированные показания следует принять за напряжение пробоя $U_{\text{пр}}$ и записать в таблицу 2. При повторном проведении эксперимента для данного материала ручкой **«грубо»** установите напряжение на 10% меньше измеренных и ручкой **«точно»** повышайте напряжение до пробоя.

11. Отключите напряжение.

12. Рассчитайте электрическую прочность материала по формуле $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/h$, полученные данные запишите в таблицу 2.

13. Оцените погрешность определения электрической прочности материала по формуле $\frac{\Delta E_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{U_{\text{пр}}} + \frac{\Delta h}{h}$, полученные значения запишите в таблицу 2.

14. Установите другой образец из этого же материала или сместите исследуемый не менее чем на 40 мм от точки пробоя, выполняя пункты 2–7.

15. Измерьте напряжение пробоя не менее 3 раз, при этом первое измеренное напряжение не применяется для дальнейших расчетов.

16. Рассчитайте среднее значение электрической прочности материала и среднее значение погрешности проведенных измерений.

17. Сравните полученные данные с табличными для исследуемого материала, сделайте вывод.

II. Изучение зависимости электрической прочности материала от его толщины.

1. Выполните подготовку установки к работе.
2. Поднимите защитный щиток высоковольтного блока. Поднимите прижимную планку устройства крепления образца. Подведите между подвижным и неподвижным электродами измерительного блока испытуемый образец. Зафиксируйте образец *минимальной толщины* из предложенных прижимной планкой. Закройте защитный щиток высоковольтного устройства.
3. Запишите в таблицу 3 значение толщины образца по показаниям индикатора измерительной головки (можно измерить толщину материала микрометром).
4. Включите питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока. Нажмите кнопку «**Высокое напряжение**» измерительного блока.
5. Плавно регулируя напряжение ручками на измерительном блоке, добейтесь пробоя диэлектрика. В момент пробоя показания индикатора напряжения обнулятся. Последние зафиксированные показания следует принять за напряжение пробоя $U_{пр}$ и записать в таблицу 3.

Таблица 3

Материал	№ опыта	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, МВ/м	$\Delta E_{пр}$, МВ/м
1	1	h_{min}			
	2				
	...				
		h_{max}			
2	1	h_{min}			
	2				
	...				
		h_{max}			

6. Отключите напряжение.
7. Рассчитайте электрическую прочность материала по формуле $E_{пр} = U_{пр}/h$, полученные данные запишите в таблицу 2.
8. Оцените погрешность определения электрической прочности материала по формуле $\frac{\Delta E_{пр}}{E_{пр}} = \frac{\Delta U_{пр}}{U_{пр}} + \frac{\Delta h}{h}$, полученные значения запишите в таблицу 3.

9. Установите другой образец из этого же материала *большой толщины*. Измерьте напряжение пробоя и рассчитайте электрическую прочность как описано в пунктах 1–9, занося данные в таблицу 3. Повторите измерения для всех предложенных образцов.

10. Рассчитайте среднее значение электрической прочности материала и среднее значение погрешности проведенных измерений.

11. Сравните полученные данные с табличными для исследуемого материала, сделайте вывод.

12. Постройте графики зависимости $f = U_{\text{пр}}(h)$ и $f = E_{\text{пр}}(h)$, проанализируйте вид зависимости напряжения пробоя от толщины диэлектрика $f = U_{\text{пр}}(h)$ и электрической прочности от толщины диэлектрика $f = E_{\text{пр}}(h)$, сделайте вывод.

III. Изучение электрической прочности материала в зависимости от количества изолирующих слоев.

1. Выполните подготовку установки к работе.

2. Поднимите защитный щиток высоковольтного блока. Поднимите прижимную планку устройства крепления образца. Подведите между подвижным и неподвижным электродами измерительного блока испытуемый образец. Зафиксируйте *однослойный* образец прижимной планкой. Закройте защитный щиток высоковольтного устройства.

3. Запишите в таблицу 4 значение толщины образца, измеренное по показаниям индикатора измерительной головки (или по данным производителя, если используются очень тонкие слои электроизолирующего материала). Можно измерить толщину образца микрометром.

4. Включите питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока. Нажмите кнопку **«Высокое напряжение»** измерительного блока.

5. Плавно регулируя напряжение ручками на измерительном блоке, добейтесь пробоя диэлектрика. В момент пробоя показания индикатора напряжения обнулятся. Последние зафиксированные показания следует принять за напряжение пробоя $U_{\text{пр}}$ и записать в таблицу 4.

6. Отключите напряжение.

7. Рассчитайте электрическую прочность материала по формуле $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/h$, полученные данные запишите в таблицу 4.

8. Оцените погрешность определения электрической прочности материала по формуле $\frac{\Delta E_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{U_{\text{пр}}} + \frac{\Delta h}{h}$, полученные значения запишите в таблицу 4.

9. Установите другой образец, состоящий из двух слоев этого же материала, большей толщины. Измерьте напряжение пробоя и рассчитайте электрическую прочность как описано в пунктах 1–9, занося данные в таблицу 4. Проведите измерения для всех приготовленных образцов (не менее 3 слоев).

10. Рассчитайте среднее значение электрической прочности материала и среднее значение погрешности проведенных измерений $\overline{E_{\text{пр}}}$, МВ/м, $\overline{\Delta E_{\text{пр}}}$, МВ/м.

11. Постройте графики зависимости $f = U_{\text{пр}}(h)$, $f = U_{\text{пр}}(n)$, $f = E_{\text{пр}}(n)$, проанализируйте вид зависимости напряжения пробоя от толщины диэлектрика $f = U_{\text{пр}}(h)$ и сравните его с зависимостью от количества слоев диэлектрика $f = U_{\text{пр}}(n)$, сделайте вывод. Проанализируйте вид зависимости электрической прочности от толщины диэлектрика $f = E_{\text{пр}}(n)$, сравнив его с графиком зависимости $f = E_{\text{пр}}(h)$, сделайте заключение о возможности замены более толстого диэлектрика многослойным материалом.

Таблица 4

Материал	№ опыта	h , мм	n , количество слоев	$U_{\text{пр}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, МВ/м	$\Delta E_{\text{пр}}$, МВ/м
1	1	h_{min}	1			
	2		2			
	3	h_{max}	3			
2	1	h_{min}	1			
	2		2			
	3	h_{max}	3			

IV. Проверка зависимости электрической прочности изоляции от формы испытательного электрода.

1. Поднимите прижимную планку устройства крепления образца.
2. Подведите между первым подвижным и неподвижным электродами измерительного блока испытуемый образец большой площади.

3. Зафиксируйте образец прижимной планкой.
4. Закройте защитный щиток высоковольтного устройства.
5. Запишите в таблицу 5 значение толщины образца по показаниям индикатора измерительной головки (можно измерить толщину материала микрометром).

Таблица 5

№ электрода	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, МВ/м	$\Delta E_{пр}$, МВ/м
1				
2				
3				
4				

6. Включите питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока.
7. Нажмите кнопку **«Высокое напряжение»** измерительного блока.
8. Плавно регулируя напряжение ручками на измерительном блоке, добейтесь пробоя диэлектрика. В момент пробоя показания индикатора напряжения обнулится. Последние зафиксированные показания следует принять за напряжение пробоя $U_{пр}$ и записать в таблицу 5.
9. Отключите напряжение.
10. Откройте защитный щиток высоковольтного устройства.
11. При помощи механизма поворота (рисунок 10, поз. 3) поменяйте испытательный электрод 2 на электрод другой формы.
12. Измените положение образца так, чтобы от испытательного электрода до места предыдущего пробоя было не менее 40 мм.
13. Повторите измерения. Прделайте те же измерения для электродов 3 и 4.
14. Рассчитайте электрическую прочность материала по формуле $E_{пр} = U_{пр}/h$, полученные данные запишите в таблицу 5.
15. Оцените погрешность определения электрической прочности материала по формуле $\frac{\Delta E_{пр}}{E_{пр}} = \frac{\Delta U_{пр}}{U_{пр}} + \frac{\Delta h}{h}$, полученные значения запишите в таблицу 5.
16. Установите, как изменение формы электрода влияет на результаты испытаний. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление электрического пробоя?
2. Что называется электрической прочностью?
3. Каковы причины пробоя диэлектриков?
4. Как пробивное напряжение диэлектрика связано с электрической прочностью?
5. Как неоднородность материала влияет на электрическую прочность?
6. Перечислите виды пробоя твердых диэлектриков и объясните их физическую сущность.
7. Какой диэлектрик имеет большую электрическую прочность – плотный или пористый? Почему?
8. От чего зависит главным образом электрическая прочность при электрической форме пробоя?
9. С чем связано снижение пробивного напряжения изоляции от времени?
10. При каких условиях возможен электротепловой (тепловой) пробой?
11. Какие факторы обуславливают снижение электрической прочности при тепловой форме пробоя?
12. Чем обусловлен электрохимический пробой?
13. Что представляет собой электротермический пробой?
14. Какие электроды используются для получения однородного поля?
15. Характерные черты электрического и теплового пробоев.
16. Как зависит электрическая прочность $E_{пр}$ от толщины диэлектрика, состоящего из тонких листов неоднородного материала?
17. Методика измерения пробивного напряжения.
18. Причины «старения» диэлектрика в электрическом поле.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема и описание лабораторной установки.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчетов и экспериментальные зависимости напряжения пробоя от толщины диэлектрического материала, от количества слоев электроизолирующего материала, зависимость напряжения пробоя от формы испытательного электрода.
5. Выводы.

Литература

1. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учеб. пособие / А. С. Серебряков. – М. : Маршрут, 2005. – 280 с.
2. Конструкционные и электротехнические материалы / под ред. В. А. Филикова. – М. : Высш. шк., 1990. – 294 с.
3. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн ; пер. с англ. К. Н. Золотовой и Д. О. Чаркина ; под ред. В. П. Зломина. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 400 с.
4. Богородский, Н. П. Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н. П. Богородский, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев – Л. : Энергоатомиздат, ЛО, 1985. – 304 с.
5. Электротехнические и конструкционные материалы [Электронный ресурс] : электронный учеб.-метод. комплекс по учеб. дисциплине «Электротехнические и конструкционные материалы» / Минсельхозпрод РБ, УО «БГАТУ», АЭФ, Кафедра ППС ; сост.: Т. М. Ткаченко [и др.]. – Электронные данные (145 674 731 байт). – Минск : БГАТУ, 2017.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование полупроводниковых материалов. Эффект Холла

Цель работы: экспериментальное определение зависимости электропроводности полупроводника, концентрации и подвижности носителей заряда от температуры и определение ширины запрещенной зоны полупроводника на основании полученных зависимостей. Определение зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля и тока, протекающего через исследуемый образец, определение типа носителей заряда.

Краткие теоретические сведения

Одними из основных характеристик полупроводниковых материалов являются концентрация и подвижность носителей заряда, а так же ширина запрещенной зоны. Эти характеристики определяют электропроводность полупроводников.

Рассмотрим первые из них. В общем случае удельная электропроводность полупроводника зависит от концентрации электронов n и дырок p , их подвижностей μ_n и μ_p и равна

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление.

В случае примесной проводимости, когда один тип носителей заряда преобладает над другим, в формуле (1) одним из слагаемых можно пренебречь. Тогда для полупроводника с электронной проводимостью (полупроводник n -типа)

$$\sigma = en\mu_n, \quad (2)$$

а для полупроводника p -типа

$$\sigma = ep\mu_p. \quad (3)$$

В данной работе исследуется полупроводник с примесной проводимостью. Определение концентрации носителей заряда, их знака и подвижности осуществляется на основе *эффекта Холла*.

Эффект Холла – одно из *гальваномагнитных явлений*, возникающих при одновременном действии на движущийся электрон электрического и магнитного полей.

Пусть в однородном полупроводнике в форме прямоугольной пластины длиной l , шириной b и толщиной d течет ток вдоль оси x (рисунок 1).

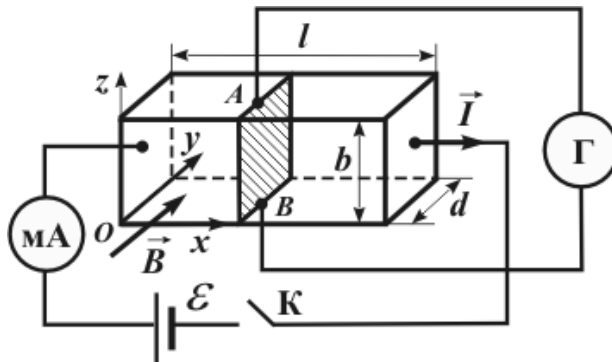


Рисунок 1

Перпендикулярные к направлению тока плоскости являются эквипотенциальными, поэтому разность потенциалов между точками А и В будет равна нулю. Если пластину поместить в магнитное поле, вектор магнитной индукции \vec{B} которого направлен вдоль оси Y , то между точками А и В возникает разность потенциалов, которая называется *холловской* или *ЭДС Холла*.

Экспериментально установлено, что эта разность потенциалов пропорциональна току I в пластине, индукции магнитного поля B и обратно пропорциональна толщине пластины d , это значит,

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B = R \frac{IB}{d}. \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности R зависит от рода вещества и называется *постоянной Холла*.

Возникновение ЭДС Холла объясняется взаимодействием носителей заряда с магнитным полем.

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}], \quad (5)$$

перпендикулярная скорости частицы \vec{v} и вектору магнитной индукции \vec{B} .

Под действием этой силы носители заряда будут смещаться, в результате на гранях пластины возникнут заряды разного знака. Между гранями возникает холловская разность потенциалов, а внутри пластины – поперечное электрическое поле напряженностью \vec{E} , направление которого, как видно из рисунка 3, зависит от знака носителей заряда.

Напряженность этого поля

$$E = \frac{\Phi_A - \Phi_B}{b}, \quad (6)$$

где $\Phi_A - \Phi_B$ – разность потенциалов Холла;
 b – ширина пластины.

Направление силы Лоренца, а следовательно и направление смещения носителей заряда, определяется по правилу левой руки. Если направления тока и магнитного поля такие, как показано на рисунке 2, то и электроны и дырки будут смещаться вверх. Следовательно, в образце с дырочной проводимостью (рисунок 2, а) верхняя грань заряжена положительно, а нижняя – отрицательно. В образце n -типа (рисунок 2, б) – наоборот: смещающиеся вверх электроны заряжают верхнюю грань отрицательно, а нижнюю – положительно. Таким образом, по знаку ЭДС Холла можно определить знак носителей заряда.

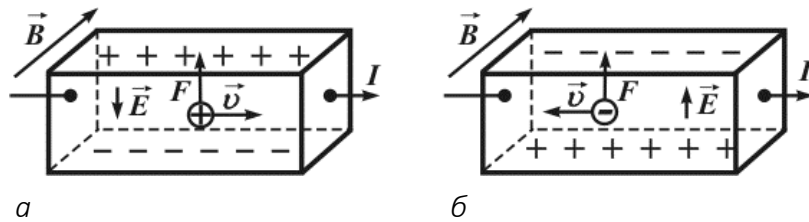


Рисунок 2

Постоянную Холла R в формуле (4) можно выразить через концентрацию носителей заряда. Для этого воспользуемся тем условием, что в стационарном состоянии сила Лоренца, действующая на носители заряда, уравновешена электростатической силой. Поэтому $e\upsilon B = eE$, откуда

$$\upsilon B = E. \quad (7)$$

Будем считать, что пластина изготовлена из полупроводника n -типа. Тогда из (4) и (6) с учетом того, что ток

$$I = jS = ne\upsilon S = ne\upsilon bd, \quad (8)$$

где j – плотность тока;
 $S = bd$ – площадь сечения образца;
 n и e – концентрация и заряд носителей тока соответственно;
 υ – их дрейфовая скорость,

следует, что
$$R = \frac{1}{ne}. \quad (9)$$

Очевидно, что для полупроводника p -типа

$$R = \frac{1}{pe}, \quad (10)$$

где p – концентрация дырок.

Формулы (9) и (10) дают возможность определить концентрацию электронов n или дырок p , если экспериментально будет определена постоянная Холла. Если экспериментально определить еще и удельное сопротивление полупроводника, то можно вычислить и подвижности электронов μ_n или дырок μ_p .

Действительно, используя закон Ома в дифференциальной форме $j = \sigma E$ и учитывая, что $j = nev$, получим

$$nev = \sigma E = \frac{1}{\rho} E,$$

откуда

$$\frac{1}{ne} = \rho \frac{v}{E} = \rho \mu, \quad (11)$$

где ρ – удельное сопротивление образца полупроводника;

μ – подвижность носителей заряда.

Из (9) и (11) следует, что

$$\mu = \frac{R}{\rho}. \quad (12)$$

Для определения удельного сопротивления образца полупроводника необходимо измерить его сопротивление R , длину l , площадь поперечного сечения S и вычислить ρ по формуле:

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{U S}{I l}; \quad (13)$$

В лабораторной работе исследуется образец со следующими размерами: длина $l = 2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; площадь поперечного сечения образца $S = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Зависимость электропроводности от температуры

Для того чтобы найти зависимость электропроводности от температуры, необходимо выяснить, как изменяются концентрации носителей заряда и их подвижности с изменением температуры. Рассмотрим чистый полупроводник, не содержащий примесей. Пусть ширина его запрещенной зоны равна ΔE_0 . Примем наименьший уровень зоны проводимости за начало отсчета энергии.

Для участия в электрическом токе валентный электрон должен перейти из связанного состояния в валентной зоне в свободное состояние в зоне проводимости. Очевидно, что минимальная энергия, необходимая для такого перехода, равна ширине запрещенной зоны ΔE_0 . Эта энергия может быть сообщена электрону за счет теплового движения. Концентрация электронов в зоне проводимости

$$n_i = \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{E_F}{kT}}, \quad (14)$$

а для концентрации дырок справедливо выражение

$$p_i = \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{\Delta E_0 + E_F}{kT}}. \quad (15)$$

В собственном полупроводнике выполняется условие $n_i = p_i$, тогда из (14) и (15) получим

$$n_i = \sqrt{n_i p_i} \frac{2(2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{\Delta E_0}{2kT}}. \quad (16)$$

Рассмотрим зависимость подвижности от температуры. По определению дрейфовая подвижность равна отношению дрейфовой скорости к напряженности электрического поля $\mu_n = \frac{v_n}{E} = \frac{e\tau_n}{m_n^*}$. Подставляя время релаксации,

равное $\tau_n = \frac{A}{\sqrt{\frac{3kT^3}{m_n^*}}}$, получим выражение для подвижности электронов:

$$\mu_n = \frac{eA}{\sqrt{3km_n^*}} T^{-3/2} = BT^{-3/2}. \quad (17)$$

Аналогично для дырок

$$\mu_p = CT^{-3/2} \quad (18)$$

Из (1), (14), (17), (18) получаем выражение для электропроводности собственного полупроводника:

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E_0}{2kT}}. \quad (19)$$

Прологарифмировав последнее выражение, можно выразить изменение проводимости при изменении температуры:

$$\Delta \ln \sigma_i = -\frac{\Delta E_0}{2k} \Delta \left(\frac{1}{T} \right), \quad (20)$$

где $\Delta \ln \sigma_i = \ln \sigma_2 - \ln \sigma_1 = \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1};$

$$k = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}.$$

Ширину запрещенной зоны определяют по выражению

$$\Delta E_0 = -\frac{2k \Delta \ln \sigma_i}{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)}. \quad (21)$$

Электропроводность можно выразить из (13):

$$\sigma_i = \frac{Il}{US}.$$

В переменных $\ln \sigma$ и $1/T$ график этой зависимости имеет вид прямой (рисунок 3), причём ширина запрещённой зоны пропорциональна угловому коэффициенту наклона этой прямой, определённому по координатам двух точек $(\ln \sigma_1, 1/T_1)$ и $(\ln \sigma_2, 1/T_2)$.

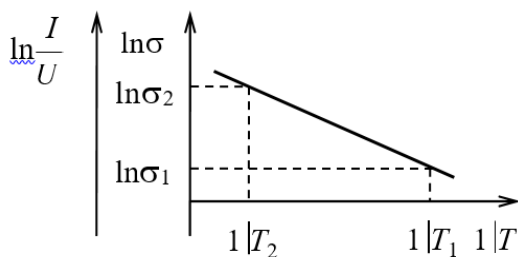


Рисунок 3. – К определению ширины запрещенной зоны полупроводника

Таким образом, экспериментально измерив электропроводность, постоянную Холла и их зависимость от температуры, можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника, тип носителей заряда и установить зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от температуры.

Описание стенда для проведения измерений

Оборудование: исследуемый образец полупроводника, магнитная система на основе электромагнита, реостаты 500 и 100 Ом, электронные цифровые приборы М890G, зеркальный гальванометр, ключ, переключатель, эталонный конденсатор, соединительные провода.

Описание установки и метода измерения. Схема установки приведена на рисунке 4. В качестве исследуемого образца используется антимонид индия (InSb), из которого сделана прямоугольная пластина. К пластине припаяны пять электродов из тонкой медной проволоки в точках 1, 2, 3, 4 и 6 (рисунок 4).

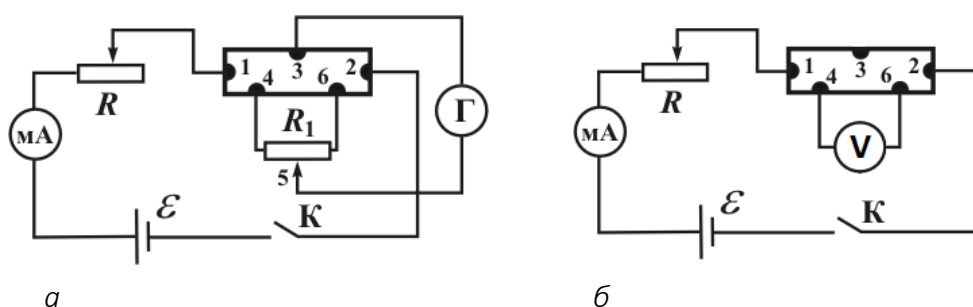


Рисунок 4

Через контакты 1 и 2 образец присоединяется к источнику тока. Величина тока регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром (МА). ЭДС Холла измеряется при помощи гальванометра Γ или милливольтметра.

При измерении ЭДС Холла используется контакт 3, который находится на верхней грани образца, и два контакта – 4 и 6 (рисунок 4, а) на противоположной грани. Подключение потенциометра R_1 вызвано тем, что практически невозможно припаять контакты на противоположных гранях образца так, чтобы они находились на одной эквипотенциальной поверхности. Следовательно, при прохождении через образец тока значения на милливольтметре будут изменяться даже при отсутствии магнитного поля. Если к контактам 4 и 6 присоединить потенциометр R_1 , то, передвигая его ползунок, можно добиться условия, что при отсутствии магнитного поля показания на милливольтметре будут равными нулю.

Магнитное поле в образце создается электромагнитом. При измерении ЭДС Холла держатель с образцом полупроводника помещают между полюсами магнита, пропускают через него ток и измеряют возникающую разность потенциалов.

Для большей точности измерения следует выполнять при двух противоположных направлениях магнитного поля (при исследовании зависимости от магнитной индукции) и направлениях тока (при исследовании зависимости от силы тока) в полупроводнике, что необходимо для исключения возможной ошибки.

Тогда значения разности потенциалов Холла $\Delta\varphi$, полученные при разных направлениях магнитного поля, определяются по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \quad (22)$$

где φ_1 , φ_2 значения, полученные из двух измерений при взаимно противоположном направлении магнитного поля (тока) по отношению к образцу.

В выражении для определения удельного сопротивления образца полупроводника не учитывается сопротивление подводящих ток проводов и переходное сопротивление контактов к образцу. Это вполне допустимо, если эти сопротивления малы, однако малое значение переходного сопротивления контактов выполнить непросто, если речь идет о контактах к полупроводниковым материалам.

Так как вольтметр измеряет суммарное падение напряжения на образце и на контактах, то определить сопротивление только образца, без контактов, в таком случае невозможно. Избавиться от ошибки, вносимой падением напряжения на токовых контактах, можно подсоединив вольтметр не ко всему образцу, а к его части, как это показано на рисунке 4, б. При этом в формуле длину образца следует заменить на расстояние между измерительными контактами. Необходимо, чтобы входное сопротивление вольтметра было настолько большим, чтобы ток с образца в вольтметр практически не отшелся и чтобы оно было много больше, чем сопротивление контактов к образцу. Тогда ток, протекающий в цепи вольтметра, будет мал и не создаст существенного падения напряжения на контактах потенциальных проводов к образцу, в то время как интересующее нас падение напряжения на участке образца будет создаваться гораздо большим током от источника питания.

Конструктивно стенд состоит из блока управления, содержащего все необходимые для проведения лабораторных работ электронные устройства

(рисунок 5). На панели стенда размещен соленоид, цифровые индикаторы, показывающие значения измеренного тока через образец из полупроводникового материала, индукцию магнитного поля в зазоре магнитопровода соленоида, температуру образца и наведенную ЭДС Холла. На верхней панели блока размещены регуляторы и переключатели для изменения полярности тока через образец, индукции магнитного поля, выключатель нагревателя и регулятор температуры. На задней стенке блока управления размещены силовой шнур, предохранитель, гнездо **USB** для подключения системы измерений к персональному компьютеру.

В зазор соленоида помещена плата образца, на которой содержатся собственно сам полупроводниковый образец, нагреватель, датчик температуры и датчик индукции магнитного поля (нормированный аналоговый датчик Холла с термокомпенсацией).

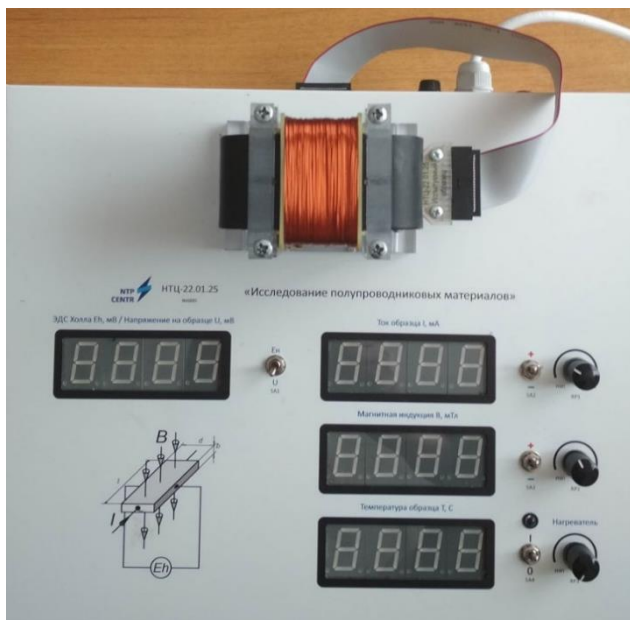


Рисунок 5. – Внешний вид лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

Подготовка установки к работе.

1. Провести осмотр установки, проверить комплектность. При обнаружении повреждений работа со стендом запрещается, сообщить о повреждении преподавателю.
2. Вставить плату образца в зазор магнитопровода соленоида, убедиться в правильной ориентации платы – ключом разъема вверх.
3. Подключить стенд к электросети однофазного переменного тока 220 В, 50 Гц с защитным заземляющим проводником.

4. Перевести все регуляторы в исходное положение – до упора против часовой стрелки.

5. Включить тумблер питания на задней стенке стенда.

6. Плавно вращать регулятор индукции магнитного поля **RP2** по часовой стрелке и обратно в пределах до 30–60 градусов. Индукция магнитного поля должна линейно меняться в соответствии с вращением регулятора. В случае, если даже при небольшом повороте регулятора индукция возрастает до максимального по модулю значения и при дальнейшем вращении регулятора не меняется, необходимо выключить тумблер питания, извлечь плату образца из зазора магнитопровода соленоида, перевернуть плату образца нижней плоскостью вверх и снова разместить ее в зазоре магнитопровода соленоида. Повторить проверку линейности регулирования индукции магнитного поля в зазоре регулятором.

7. Установка готова к работе.

Задание 1. *Определение зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля.*

1. Выполните подготовку установки к работе.

2. Поместите образец между полюсами магнита. Включите источник тока, установите регулятором **RP1** ток через образец 3 мА.

3. Установите регулятором **RP2** величину индукции магнитного поля 10 мТл. Полученные данные занесите в таблицу 1.

4. Измерьте ЭДС Холла φ_1 .

5. Измените направление магнитного поля при помощи тумблера **SA3**, повторно измерьте ЭДС Холла φ_2 . Полученные данные занесите в таблицу 1.

6. Найдите среднее значение ЭДС Холла $\Delta\varphi = (|\varphi_1| + |\varphi_2|) / 2$.

Таблица 1

№ п/п	I , мА	B , мТл	φ_1 , В	φ_2 , В	$\Delta\varphi$, В	$R \pm \Delta R$, м ³ /А·с
1	3	10				
...						
6	3	60				

7. Изменяя величину магнитного поля до 60 мТл с шагом 10 мТл, проведите повторно измерения по пунктам 3–6.

8. Постройте график зависимости $\Delta\varphi = f(B)$.

9. По формуле (4) найдите постоянную Холла. Оцените погрешность определения постоянной Холла.

Задание 2. Определение зависимости ЭДС Холла от силы тока, протекающего через полупроводник.

1. Выполните подготовку установки к работе.
2. Поместите образец между полюсами магнита. Включите источник тока, установите ток через образец 3 мА при помощи регулятора **RP1**.
3. Установите индукцию магнитного поля 30 мТл при помощи регулятора **RP2**.
4. Измерьте ЭДС Холла φ_1 .
5. Измените направление тока через образец при помощи тумблера **SA2** и повторно измерьте ЭДС Холла φ_2 . Полученные данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	B , мТл	I , мА	φ_1 , В	φ_2 , В	$\Delta\varphi$, В	$R \pm \Delta R$, м ³ /А·с
1	30	3,0				
2	30	3,1				
...						
20	30	5,0				

6. Найдите среднее значение ЭДС Холла $\Delta\varphi = (|\varphi_1| + |\varphi_2|) / 2$. Полученные данные занесите в таблицу 2.
7. Изменяя величину тока через образец до 5 мА с шагом 0,1 мА повторите измерения по пунктам 2–6.
8. Постройте график зависимости $\Delta\varphi = f(I)$.
9. По формуле (4) найдите постоянную Холла. Оцените погрешность определения постоянной Холла.

Задание 3. Измерение зависимости электропроводности полупроводника, концентрации и подвижности носителей заряда и постоянной Холла от температуры.

1. Поместите образец между полюсами магнита. Включите источник тока, установите ток через образец 3 мА при помощи регулятора **RP1**.
2. Наблюдайте и запишите показания милливольтметра, измеряющего напряжение на образце без включения электромагнита! Для этого переключите тумблер **SA1** в положение **U**.
3. Используя формулу (13) найдите удельное сопротивление полупроводника при комнатной температуре (ρ) и запишите его значение в таблицу 4.

4. Включите электромагнит, переключив положение тумблера **SA1** в положение **E_n**. Установите величину магнитной индукции 30 мТл регулятором **RP2**. Наблюдайте и запишите значение ЭДС Холла. Отключите электромагнит после проведения измерений.

5. По формуле (4) найдите постоянную Холла (R). По формулам (9) и (12) найдите концентрацию носителей зарядов (n) и их подвижность (μ) и оцените погрешность полученных значений. Результаты измерений запишите в таблицу 4.

6. Включите нагрев, переключив тумблер **SA4** в верхнее положение. Поверните вправо на небольшой угол регулятор, находящийся справа от тумблера **SA4**. При этом должна загореться лампочка. Дождитесь повышения температуры в нагревательной камере с полупроводником на 5 °С.

7. Повторите измерения и вычисления по пунктам 2–5, последовательно нагревая образец до заданной температуры. Изменяйте температуру с интервалом в 5 °С. *Выше 50 °С образец не нагревать!*

8. Данные измерений занесите в таблицу 3.

9. Постройте графики зависимости $R = f(T)$; $n = f(T)$; $\mu = f(T)$; $\rho = f(T)$.

Таблица 3. – Результаты измерений

T, K	U, B	φ_1, B	φ_2, B	$\Delta\varphi, B$
293				
...				
283				

Таблица 4. – Результаты вычислений

T, K	$\rho \pm \Delta\rho,$ Ом·м	$n \pm \Delta n,$ м ⁻³	$\mu \pm \Delta\mu,$ м ² /В·с	$R \pm \Delta R,$ м ³ /А·с	$\ln\sigma$	$1/T, K^{-1}$
293						
....						
283						

Задание 4. *Определение ширины запрещенной зоны материала и типа носителей заряда.*

1. Используя данные, полученные в упражнении 3, рассчитайте значения

$$\sigma = f(T) \text{ и } \ln\sigma = f(T).$$

2. Постройте график зависимости $\ln\sigma = f(1/T)$. По полученному графику зависимости определите ширину запрещенной зоны полупроводника графически. Оцените погрешность определения ширины запрещенной зоны

$$\Delta E_0 = -\frac{2k\Delta \ln\sigma_i}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}.$$

3. Сравните полученный результат с табличным для данного полупроводника, сделайте вывод.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание измерительной установки.
3. Расчетные формулы и примеры расчетов.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений
5. Графики зависимостей.
6. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под скоростью дрейфа носителей заряда?
2. Что называют подвижностью носителей заряда?
3. Объясните сущность эффекта Холла.
4. Как определить величину и направление силы Лоренца?
5. От чего зависит знак постоянной Холла?
6. Как постоянная Холла связана с подвижностью носителей заряда и удельной проводимостью вещества полупроводника?
7. Почему постоянная Холла в полупроводнике значительно больше, чем в металлах?
8. Получите формулы (9) (12) и (14).
9. Как в данной работе определяется величина индукции магнитного поля? В чем заключается эффект Холла?
10. Что такое классический эффект Холла?
11. Записать выражение для силы Лоренца, действующей на носители заряда (в векторном виде). Определить направление силы Лоренца для двух разных направлений тока I и индукции магнитного поля B .

12. Вывести основное выражение для ЭДС Холла. Написать выражение для постоянной Холла и рассказать, как ее экспериментально определяют.
13. Как вычисляется концентрация носителей тока?
14. Определить понятие «подвижность носителей тока». Как связана подвижность носителей тока с электропроводностью вещества? Как определяется подвижность носителей тока?
15. Какие типы проводимости имеют место в полупроводниках?
16. Почему не рекомендуется производить выключение и переключение тока в обмотке электромагнита при больших значениях силы тока в ней?
17. Как по графику определить ширину запрещенной зоны полупроводника?
18. Получите формулу зависимости концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике от температуры.
19. Получите формулу зависимости электропроводности от температуры в случае собственной проводимости.

Литература

1. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – М. : КноРус, 2012. – Т. 3 : § 43, 51–55, 57–59.
2. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела / Г. И. Епифанов. - М. : Высш. шк., 1996. – Гл. 7, п. 2–7.
3. Корнилович, А. А. Физика в примерах : учеб. пособие / А. А. Корнилович. – Новосибирск : НГТУ, 2003. – Гл. 16.
4. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1980. – 688 с.
5. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
6. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М. : Высш. шк., 1987. – 477 с.
7. Павлов, Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л. П. Павлов. – М. : Высш. шк., 1987. – 239 с.
8. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 2008.
9. Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм / А. Н. Матвеев. – М. : Наука, 2005.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование электропроводности жидких диэлектриков

Цель работы: исследование электропроводности жидких диэлектриков; изучение электролиза водных растворов солей.

Краткие теоретические сведения

Характер электропроводности жидких диэлектриков

Удельная проводимость определяется как способность вещества проводить электрический ток. Это величина, обратная удельному сопротивлению. *Удельная электрическая проводимость* – это способность одного кубического сантиметра вещества проводить определенный электрический заряд. Это свойство для жидкости обусловлено движением ионов под действием электрического поля. *Удельная электропроводность* соответствует электропроводности 1 м^3 раствора, находящегося между двумя параллельными электродами площадью 1 м^2 каждый и на расстоянии 1 м друг от друга (См/м).

Основная единица измерения сопротивления – Ом. Удельная проводимость измеряется в Сименсах (См).

Электропроводность жидких диэлектриков носит ионный и молионный (катафоретический) характер. В неполярных и слабополярных жидкостях носителями заряда в основном являются ионы, возникающие при диссоциации молекул примесей. Электропроводность неполярных диэлектриков (например, нефтяных электроизоляционных масел) определяется в основном только природой и концентрацией ионогенной примеси. Следовательно, удельное сопротивление технически чистых жидких неполярных диэлектриков относительно велико. Молекулы ионогенной примеси диссоциируют на ионы и тем сильнее, чем больше их полярность и выше температура; сопротивление диэлектрика при этом снижается. Молекулы неполярной примеси диссоциировать не могут, поэтому их присутствие в жидком неполярном диэлектрике не представляет опасности.

В жидких полярных диэлектриках (например, в полихлордифениле) наряду с молекулами ионогенной примеси могут диссоциировать и собственные молекулы и тем значительнее, чем выше полярность диэлектрика и температура. При этом ионогенная примесь под действием полярных молекул диэлектрика диссоциирует значительно сильнее, чем в случае неполярного диэлектрика. Все это приводит к большей (по сравнению с неполярными

диэлектриками) концентрации образующихся ионов. Поэтому удельное сопротивление жидких полярных диэлектриков всегда ниже, чем у неполярных. Сильнополярные жидкости отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью.

Степень диссоциации (отношение числа диссоциированных молекул к общему числу молекул жидкости) зависит от химической природы примесей, концентрации и диэлектрической проницаемости. Степень диссоциации возрастает с увеличением диэлектрической проницаемости.

Собственная ионная электропроводность наблюдается при диссоциации молекул жидкости с ионным характером связи.

Электронная электропроводность может наблюдаться в сильных полях при эмиссии электронов с катода в тщательно очищенных от примесей жидкостях.

Молионная электропроводность характерна для коллоидных растворов, например для многих электроизоляционных лаков в неотвержденном состоянии, содержащих мелкодисперсный наполнитель, пигмент и др.

Знак заряда частицы будет положительным, если диэлектрическая проницаемость частиц больше диэлектрической проницаемости растворителя и наоборот. Такие заряженные частицы называют *молионами*.

В результате термоокислительных процессов, протекающих при старении, в жидких диэлектриках при деструкции (распаде) из части молекул образуются органические кислоты и вода, которые диссоциируют на положительные и отрицательные ионы; в результате увеличивается ионная проводимость. При структурировании n молекул диэлектрика с помощью химической связи объединяются в длинные цепи через «кислородные мостики». Эти молекулярные цепи агрегируют в клубки, образуя ядра коллоидных частиц. Ядра могут образовывать также и другие микроскопические частицы дисперсной фазы (воды, механических частиц и т.п.). Ядра притягивают и адсорбируют на своей поверхности ионы преимущественно одного знака (положительные либо отрицательные), а также небольшое количество полярных молекул примеси, например воды или жидкого диэлектрика, образуя адсорбционный слой. Ядро с адсорбционным слоем представляет собой единый комплекс, самостоятельно перемещающийся в диэлектрике и называющийся *коллоидной частицей*.

Если приложить электрическое поле, то часть диффузионного слоя отделится и начнет перемещаться в одном направлении, а ядро с адсорбционным слоем и оставшейся частью диффузионного слоя – в другом. Возникнет электрофоретический ток. Этот вид проводимости может приводить к аварийной ситуации.

Зависимость электропроводности от температуры

Электропроводность жидкостей обусловлена ионами, образующимися при диссоциации молекул самой жидкости или ее примесей. В связи с увеличением энергии хаотического теплового движения молекул степень ионизации и концентрация ионов растут с повышением температуры по экспоненциальному закону:

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{W_d}{kT}}, \quad (1)$$

где n_0 – концентрация ионов при начальной температуре;

W_d – энергия диссоциации;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Удельная проводимость жидкости определяется по формуле

$$\gamma = n \cdot q \cdot (\mu_+ + \mu_-) = A \cdot e^{-\frac{\alpha}{T}}, \quad (2)$$

где μ_+ и μ_- – подвижности положительных и отрицательных ионов соответственно;

α – степень диссоциации;

A – константа.

Степень диссоциации молекул определяется по выражению

$$\alpha = \frac{W_d}{k}. \quad (3)$$

Натуральный логарифм проводимости жидкости линейно уменьшается с увеличением обратной абсолютной температуры $1/T$, как в собственных полупроводниках (рисунок 1). Однако, в отличие от них, показатель экспоненты в жидкостях определяется энергией их диссоциации.

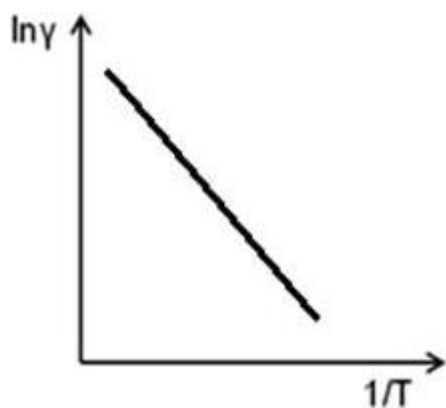


Рисунок 1. – Зависимость проводимости жидких диэлектриков от температуры

Удельное сопротивление жидкостей

$$\rho = B \cdot e^{\frac{\alpha}{T}}, \quad (4)$$

где B – константа.

По аналогичному закону изменяется вязкость жидкостей η . Зависимость $\rho = f(T)$ объясняется как температурным изменением вязкости, так и температурной диссоциацией молекул.

Удельные проводимости неполярных, слабополярных и сильнополярных жидких диэлектриков приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Удельные проводимости жидкостей при 20 °С

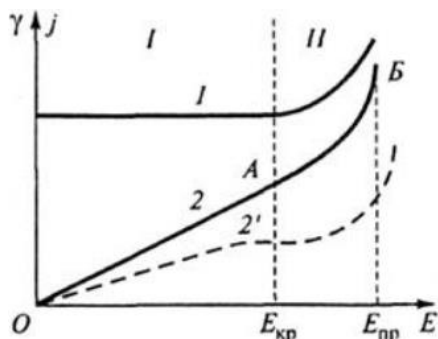
Жидкость	Особенности строения	ρ , Ом · м
Бензол	Неполярные	$10^{10} - 10^{12}$
Трансформаторное масло, бензин		$10^{10} - 10^{13}$
Совол, касторовое масло	Слабополярные	$10^8 - 10^{10}$
Этиловый спирт, ацетон	Сильнополярные	$10^4 - 10^5$
Дистиллированная вода		$10^3 - 10^4$

Закон Ома в жидкостях нарушается в сильных полях ($E = 0,05 - 0,06$ МВ/м).

Возможные причины:

- диссоциация молекул жидкости, приводящая к резкому росту концентрации ионов;
- увеличение подвижности;
- автоэлектронная эмиссия электронов с катода в тщательно очищенных жидкостях.

На рисунке 2 показаны зависимости электропроводности γ и плотности тока j от напряженности электрического поля для жидких диэлектриков различной чистоты.



$2'$ – $j(E)$ для очень чистого диэлектрика;

I – слабое поле; II – сильное поле

Рисунок 2. – Зависимость удельной электропроводности γ (1) и плотности тока j (2, 2') жидких диэлектриков от напряженности электрического поля

Резкое возрастание плотности тока и электропроводности с увеличением напряженности электрического поля в сильных полях вызвано, во-первых, увеличением концентрации n носителей заряда в результате холодной эмиссии из катода, электронной ударной ионизации и фотоионизации и, во-вторых, увеличением подвижности зарядов.

У тщательно очищенных жидких диэлектриков на кривой зависимости $j(E)$ возможен горизонтальный участок, соответствующий току насыщения. В жидких диэлектриках высокой степени чистоты удельная электропроводность очень низкая и обуславливается ионизирующим воздействием космических лучей и радиацией Земли. Ее можно считать «естественной» электропроводностью жидких диэлектриков. Если поместить измеряемую жидкость в экранированную камеру, то «естественная» электропроводность значительно снижается.

Применение жидких диэлектриков

Жидкие изоляционные материалы применяются в силовых и измерительных трансформаторах, выключателях, конденсаторах, кабелях и других электротехнических изделиях, а также используются в качестве изолирующей среды между элементами, находящимися под напряжением, например в трансформаторах, пропиточной среды в слоистой изоляции (масло в конденсаторах и кабелях), охлаждающей среды в трансформаторах, дугогасящей среды, например в масляных выключателях, диэлектрической среды с особо высокой диэлектрической проницаемостью в конденсаторах. В зависимости от требований, предъявляемых в конкретных условиях к жидкой изоляции, используются жидкости с большей или меньшей вязкостью минерального или синтетического происхождения, такие как силиконы, полиалкены (например, полиизобутилы), алкольбензолы, хлорбензолы, хлорированные дифенилы и др.

Электролиз

Электролит – это вещество, обладающее ионной проводимостью. Электролиты называют проводниками второго рода. Прохождение тока через проводник сопровождается переносом вещества. К электролитам относятся расплавы солей, оксидов или гидроксидов, а также растворы солей, кислот или оснований в полярных растворителях, например в воде. *Ток в растворах электролитов* – это упорядоченное движение ионов. *Проводимость жидких электролитов* объясняется тем, что при растворении в воде нейтральные молекулы солей, кислот и оснований распадаются на отрицательные и положительные ионы. В электрическом поле ионы приходят в движение и создают электрический ток.

Удельная электропроводность электролитов зависит от концентрации водных растворов при постоянной температуре. При равных концентрациях растворов проводимость растворов сильных электролитов значительно выше, чем слабых, так как в них содержится больше ионов – носителей электричества. С увеличением концентрации удельная электропроводность сначала растет как в растворах сильных, так и слабых электролитов, так как увеличивается количество ионов в растворе. Далее с ростом концентрации наблюдается максимум и в области высоких концентраций – уменьшение удельной электропроводности. Для сильных электролитов это связано с увеличением вязкости раствора и усилением электростатического взаимодействия между ионами, что уменьшает скорость их движения и, соответственно, удельную электропроводность. Для слабых электролитов понижение удельной электропроводности в области высоких концентраций связано с уменьшением степени диссоциации и, следовательно, уменьшением количества ионов. На рисунке 3 приведена зависимость удельной электропроводности от концентрации водных растворов при постоянной температуре.

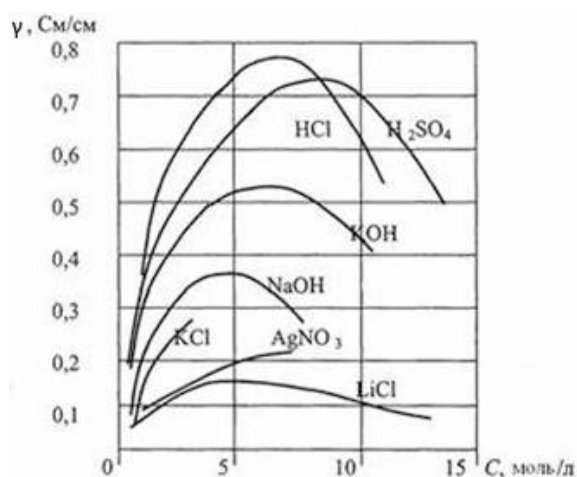


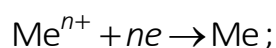
Рисунок 3. – Зависимость удельной электропроводности от концентрации водных растворов при постоянной температуре

Электролиз – это окислительно-восстановительный процесс, который происходит на электродах во время прохождения электрического тока через расплав или раствор. При электролизе катод (–) имеет отрицательный заряд, к нему движутся положительно заряженные катионы, которые принимают электроны и восстанавливаются. Анод (+) – электрод, который имеет положительный заряд, к нему движутся отрицательно заряженные анионы, они отдают электроны аноду и окисляются. Различают *электролиз растворов* и *электролиз расплавов*. Оба эти процесса существенно отличаются друг от друга. Отличие – в наличии растворителя. При электролизе растворов кроме ионов самого вещества в процессе участвуют ионы растворителя, при электролизе расплавов – только ионы самого вещества.

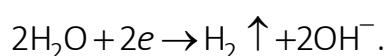
Электролиз широко используется в промышленности. Для того чтобы получить нужный продукт (газ, металл или неметалл), нужно правильно выбрать электрод и раствор электролита. Электродами могут служить любые материалы, проводящие электрический ток. В основном применяют металлы и сплавы, из неметаллов электродами могут служить, например, графитовые стержни (или углерод). Реже в качестве электрода используют жидкости. При электролизе происходит окисление анода (он растворяется) и восстановление катода. Именно поэтому анод следует брать таким, чтобы его растворение не повлияло на химический процесс, протекающий в растворе или расплаве. Такой анод называют инертным электродом. В качестве инертного анода можно взять графит (углерод) или платину. В качестве катода можно взять металлическую пластину (она не будет растворяться). Подойдет медь, латунь, углерод (или графит), цинк, железо, алюминий.

При электролизе водного раствора соли или щелочи на катоде, в зависимости от активности восстанавливающегося металла, возможны следующие реакции:

– восстановление катионов металла (Me^{n+}):



– восстановление водорода из воды:



Легче всего восстанавливаются наименее активные металлы, расположенные в ряду активности после водорода. Наиболее активные металлы

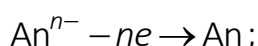
являются сильными восстановителями, поэтому обратный процесс, т.е. восстановление активных металлов из соединений, осуществить сложно. В связи с этим при электролизе водных растворов солей активных металлов на катоде протекает восстановление не катионов этих металлов, а воды с образованием водорода. Для металлов со средней химической активностью, расположенных в ряду активности после алюминия, на катоде происходят одновременно две реакции – образование водорода и выделение металла. В общем виде схема катодных процессов электролиза водных растворов солей показана на рисунке 4.

Li	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Cr	Fe	Ni	Sn	Pb	Cu	Ag	Hg	Pt	Au
Li ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Zn ²⁺	Cr ³⁺	Fe ²⁺	Ni ²⁺	Sn ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Ag ⁺	Hg ²⁺	Pt ²⁺	Au ³⁺
Только: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$						Одновременно: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{M}^{n+} + n\text{e}^- \rightarrow \text{M}$						Только: $\text{M}^{n+} + n\text{e}^- \rightarrow \text{M}$				

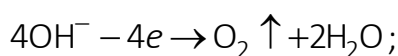
Рисунок 4. – Схема катодных процессов

При электролизе водного раствора соли или щелочи на аноде, в зависимости от природы аниона, возможны следующие реакции:

– окисление анионов (An^{n-}), образующихся при диссоциации соли или щелочи:



– для щелочи:



– окисление воды:

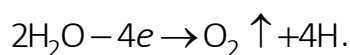


Схема анодных процессов показана на рисунке 5.

I ⁻	Br ⁻	Cl ⁻	OH ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	CO ₃ ²⁻
$2\text{I}^- - 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I} \rightarrow \text{I}_2$			$4\text{OH}^- - 4\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2\text{O} - 4\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+$				

Рисунок 5. – Схема анодных процессов

При электролизе растворов щелочей и солей кислородсодержащих кислот на аноде выделяется кислород.

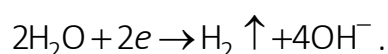
Удельная электропроводность водных растворов электролитов зависит от концентрации, как показано в таблице 2.

Таблица 2. – Удельная электропроводность водных растворов электролитов при 18 °С (значение в таблице умножить на 10⁻⁴, См/см)

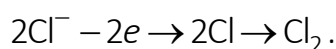
Содержание безводного электролита, %	Удельная электропроводность электролита			
	NaCl	CuSO ₄	HCl	KCl
5	672	189	3948	690
10	1211	320	6302	1359
15	1642	421	–	2020
20	1957	–	7615	2677
25	2135	–	–	–
30	–	–	6620	–
40	–	–	5152	–

Электролиз водного раствора поваренной соли (NaCl)

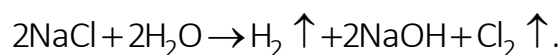
В процессе электролиза водного раствора хлорида натрия участвуют молекулы воды. Натрий располагается в ряду активности перед алюминием, поэтому на *катоде* (–) восстанавливаются не катионы натрия, а вода, при этом выделяется водород и образуются гидроксид-ионы:



На *аноде* (+) выделяется хлор:



Суммарное уравнение:



Таким образом, в процессе электролиза водного раствора хлорида натрия (рисунок б) на аноде выделяется хлор, на катоде – водород, а в растворе образуется гидроксид натрия. Эта реакция используется в промышленности для получения гидроксида натрия и хлора. При промышленном осуществлении электролиза водного раствора хлорида натрия с целью получения гидроксида натрия и хлора катодное и анодное пространства электролизера

разделяют мембраной либо пористой керамической перегородкой (диафрагмой) во избежание взаимодействия продуктов электролиза между собой.

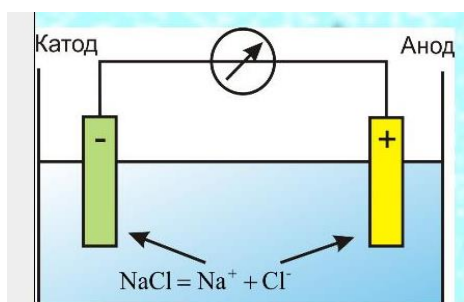
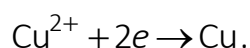


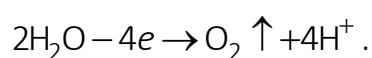
Рисунок 6. – Электролиз поваренной соли

Электролиз медного купороса ($CuSO_4$)

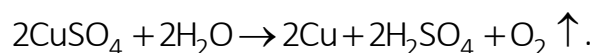
Медь располагается в ряду активности после водорода, поэтому на *катоде* (-) восстанавливается металл:



На *аноде* (+) протекает окисление воды, выделяется кислород и образуются катионы водорода:



Суммарное уравнение:



Таким образом, при электролизе водного раствора медного купороса на катоде выделяется медь, на аноде – кислород, в растворе образуется серная кислота (рисунок 7).

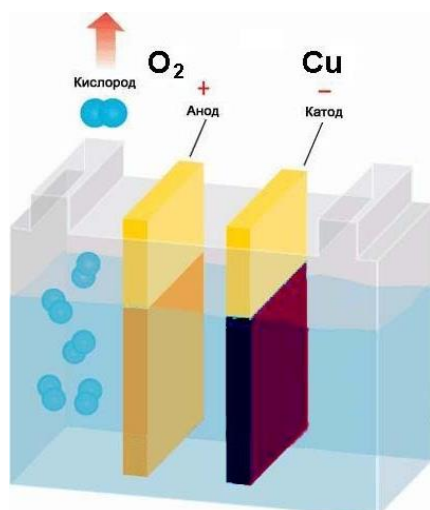
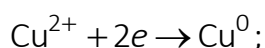


Рисунок 7. – Электролиз медного купороса

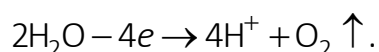
Электролиз раствора сульфата меди (CuSO₄) с нерастворимым анодом

При использовании графитовых электродов происходит выделение кислорода на аноде. Наблюдается перенос меди с анода на катод, что широко используется на практике в целях нанесения металлических покрытий или рафинирования металлов:

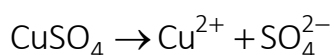
– катод (–):



– анод (+):



Суммарное уравнение:

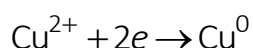


Продукты: Cu; H₂SO₄; O₂.

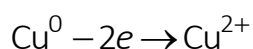
Электролиз раствора сульфата меди (CuSO₄) с растворимым анодом

В случае растворимого анода (например, медного) в начале опыта на катоде выделяется водород, а затем по мере окрашивания раствора в голубой цвет скорость выделения водорода уменьшается и одновременно катод начинает покрываться слоем меди:

– катод (–):



– анод (+):



Продукты: Cu; CuSO₄.

Электролиз кальцинированной соды (Na₂CO₃)

В процессе электролиза водного раствора кальцинированной соды (безводного углекислого натрия) у электродов образуются газы: около положительного электрода будет выделяться кислород, около отрицательного – водород. Именно такое распределение газов происходит из-за того, что возле положительного анода скапливаются отрицательные ионы OH[–] и происходит восстановление кислорода, а возле отрицательного катода скапливаются ионы щелочного металла Na⁺, которые содержатся в кальцинированной соде

и имеют положительный заряд. Одновременно происходит восстановление водорода. Восстановление ионов натрия до чистого металла Na не происходит, так как металл натрий стоит в ряду напряжений металлов левее водорода (рисунок 8).

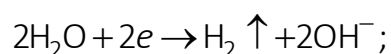
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ РЯД НАПРЯЖЕНИЙ МЕТАЛЛОВ																		
Li	K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Mn	Cr	Zn	Fe	Co	Sn	Pb	H	Cu	Hg	Ag	Au
ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ←																		
→ ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ																		

Рисунок 8. – Электрохимический ряд напряжений металлов

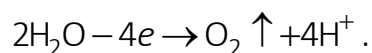
Электролиз пищевой соды (NaHCO₃).

При электролизе пищевой соды (гидрокарбоната натрия) протекают следующие реакции – на катоде идет восстановление воды, на аноде идет окисление воды:

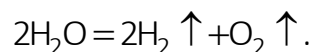
– катод (–):



– анод (+):



Итоговое уравнение электролиза:



Описание установки для проведения измерений

Конструктивно установка состоит из следующих частей: измерительный прибор (вольтметр, амперметр, встроенный источник питания), сосуд с крышкой и электродами (рисунок 9). Также в комплект лабораторной установки входит набор различных электродов (медный, цинковый, графитовый), для исследования используются водные растворы электролитов.

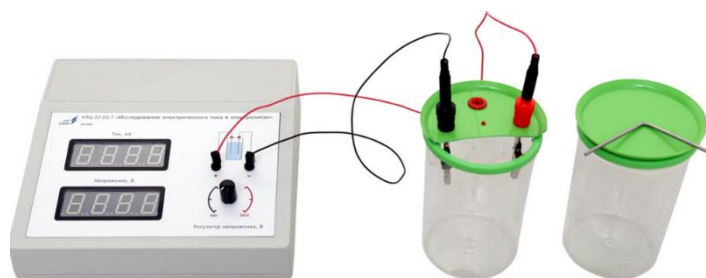


Рисунок 9. – Внешний вид лабораторной установки

Подготовка лабораторной установки к работе заключается в следующем:

- подключить с помощью соединительных проводов электроды к измерительному прибору;

- включить измерительный прибор в сеть;

- включить тумблер «Сеть» на задней стенке прибора.

Порядок выполнения работы

1. *Исследование зависимости электрических характеристик жидкостей от концентрации при постоянной температуре.*

1. Подключить измерительный прибор к контактам на крышке сосуда, соблюдая полярность.

2. Установить необходимые электроды на крышке сосуда.

3. Установить регулятор напряжения в положение «min».

4. Получить задание у преподавателя. Приготовить исследуемую жидкость заданной концентрации. Налить в сосуд исследуемую жидкость.

5. Включить измерительный прибор в сеть, включить тумблер «Сеть» на задней стенке прибора.

6. Плавно увеличивать напряжение переводом регулятора напряжения до крайнего правого положения, при этом регистрировать значения тока и напряжения, а также интенсивность накала лампы. Следить за процессами, происходящими на электродах.

7. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3. – Результаты измерений электрических характеристик жидкостей

Исследуемая жидкость	Масса вещества, г	Количество воды, мл	Концентрация раствора, %	I , А	U , В
1					
2					
3					

8. Повторить измерения для всех жидкостей, в соответствии с заданием. При исследовании раствора медного купороса измерения провести

для двух видов электродов: медного и графитового. После каждого опыта электроды тщательно промыть водой и вытереть насухо.

9. Записать уравнения электролиза для каждого вида исследуемых жидкостей.

10. Рассчитать электрическое сопротивление, удельное электрическое сопротивление, электропроводность исследованных жидкостей. Результаты занести в таблицу 4. Сделать соответствующие выводы об электропроводности различных растворов.

11. По окончании исследований отключить измерительный прибор от сети, отсоединить провода, промыть сосуд и электроды.

Таблица 4. – Результаты расчета электрических характеристик жидкостей

Исследуемая жидкость	Концентрация раствора, %	R , Ом	γ , См	ρ , Ом · м

II. Исследование зависимости электрических характеристик жидкостей от температуры

1. Подключить измерительный прибор к контактам на крышке сосуда, соблюдая полярность.

2. Установить необходимые электроды на крышке сосуда.

3. Установить регулятор напряжения в положение «min».

4. Получить задание у преподавателя.

5. Приготовить исследуемую жидкость заданной концентрации.

6. Налить в сосуд исследуемую жидкость, поместить в сосуд с исследуемой жидкостью термометр.

7. Поместить сосуд с исследуемой жидкостью на плитку.

8. Включить измерительный прибор в сеть, включить тумблер «Сеть» на задней стенке прибора. Поставить регулятор напряжения в среднее положение.

9. Включить плитку в сеть.

10. Регистрировать значения тока и напряжения через каждые 5 °С. Результаты измерений занести в таблицу 5.

11. Рассчитать электрическое сопротивление, удельное электрическое сопротивление, электропроводность жидкости при различных температурах. Результаты занести в таблицу 4.

12. Провести измерения и вычисления для всех заданных жидкостей. Результаты занести в таблицу 5. Сделать соответствующие выводы об электропроводности различных растворов.

13. Построить графики зависимости $R = f(t)$, $\rho = f(t)$.

14. По окончании работы отключить измерительный прибор и плитку от сети, отсоединить провода, промыть сосуд и электроды.

Таблица 5. – Результаты измерений и вычислений температурной зависимости электрических характеристик жидкостей

Исследуемая жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	I, A	$U, \text{В}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma, \text{См}$	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$
1	20					
	...					
	50					
2	20					
	...					
	50					
3	20					
	...					
	50					

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание лабораторной установки.
3. Результаты измерений и вычислений.
4. Графики зависимостей.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой характер носит электропроводность жидких диэлектриков?
2. Сравните электропроводность полярных и неполярных жидких диэлектриков.
3. Дайте определение удельной проводимости жидкости. В чем она измеряется?
4. Дайте определение удельного сопротивления жидкости. В чем оно измеряется?

5. Приведите зависимости электропроводности и плотности тока от напряженности электрического поля для жидких диэлектриков различной чистоты.
6. Перечислите применения жидких диэлектриков.
7. Что такое электролит? От чего зависит удельная электропроводность электролита?
8. Какие процессы (окисление или восстановление) протекают на катоде и аноде при электролизе?
9. Напишите уравнения реакций, протекающих на катоде и аноде, а также суммарное уравнение электролиза водного раствора поваренной соли.
10. Напишите уравнения реакций, протекающих на катоде и аноде, а также суммарное уравнение электролиза водного раствора медного купороса при различных видах катода.
11. Напишите уравнения реакций, протекающих на катоде и аноде, а также суммарное уравнение электролиза водного раствора кальцинированной соды.
12. Напишите уравнения реакций, протекающих на катоде и аноде, а также суммарное уравнение электролиза водного раствора пищевой соды.

Литература

1. Материаловедение : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2015. – 557 с.
2. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие / К. С. Петров. – СПб. : Питер, 2006. – 521 с.
3. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учеб. / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2021. – 448 с.
4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники : учеб. пособие / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2021. – 384 с.
5. Федотов, А. К. Физическое материаловедение : учеб. пособие : в 3 ч. / А. К. Федотов, В. М. Анищик, М. С. Тиванов. – Минск : Выш. шк., 2015. – Ч. 3 : Материалы энергетики и энергосбережения. – 463 с.