

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

## **РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ**

### ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторных работ № 15-17  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
очной формы обучения*



Воронеж 2024

УДК 621.396.6(07)  
ББК 32я7

**Составитель**

канд. физ.-мат. наук А. С. Бадаев

**Радиоматериалы и радиокомпоненты:** методические указания к выполнению лабораторных работ № 15-17 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. С. Бадаев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. – 41 с.

Данные методические указания представляют собой лабораторный практикум по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты». В методических указаниях изучаются модульный учебный комплекс МУК-РМ1, электропроводность металлов, сплавов и полупроводников. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

Методические указания предназначены для студентов 4 и 5 курсов, специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле РМиРК\_15-17.pdf.

Ил. 20. Табл. 6. Библиогр.: 3 назв.

**УДК 621.396.6(07)**  
**ББК 32я7**

**Рецензент** – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор  
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

# **1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15**

## **ИЗУЧЕНИЕ МОДУЛЬНОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МУК-РМ1 ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ»**

### **1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

#### **1.1.1. Цель работы**

Ознакомление с назначением, составом и работой модульного учебного комплекса МУК-РМ1 и входящих в его состав приборов и лабораторных стендов: измерителя электропроводности ИЭП1, измерителя ёмкости и индуктивности ЛСМ1, измерителя статических характеристик ИСХ1, генератора напряжения ГНВ1, стендов и измерительных камер с объектами исследования СЗ-РМ01, СЗ-РМ02, ИК1-1, ИК1-2, ИК1-3, ИК1-4, ИК2-1.

#### **1.1.2. Содержание работы**

Основным содержанием работы является изучение назначения, технических данных, состава, устройства и принципа работы, указаний по мерам безопасности комплекса МУК-РМ1.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

#### **1.1.3. Указания по технике безопасности**

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

### **1.2 ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**

#### **1.2.1. Задание № 1**

Ознакомиться с назначением, составом и работой комплекса МУК-РМ1.

Модульный учебный комплекс МУК-РМ1 разработан и изготовлен НИЛ Техники эксперимента Новосибирского государственного технического университета, ООО «Опытные приборы» г. Новосибирск.

##### **1.2.1.1. Назначение**

Комплекс МУК-РМ1 предназначен для проведения практикума по дисциплине «радиоматериалы и радиокомпоненты» в высших учебных заведениях (рис. 1).

Комплекс позволяет проводить следующие лабораторные работы:

1. Исследование электропроводности металлов.

2. Исследование электропроводности полупроводниковых материалов.
3. Исследование электропроводности твердых диэлектриков.
4. Исследование электрической прочности диэлектриков
5. Исследование диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в твердых диэлектриках
6. Исследование свойств сегнетоэлектриков
7. Исследование основных свойств ферритов по петле гистерезиса
8. Исследование температурной зависимости магнитной проницаемости феррита. Точка Кюри.



Рис. 1. Внешний вид комплекса

Таблица 1

Комплект поставки

Измеритель электропроводности ИЭП1	1 шт.
Измерительная камера ИК1-1 для измерения сопротивления металлических и полупроводниковых образцов (совместно с ИЭП1)	3 шт.
Измерительная камера ИК1-2 для измерения сопротивления диэлектрических образцов (совместно с ИЭП1)	3 шт.
Измеритель ёмкости и индуктивности ЛСМ1	1 шт.
Измерительная камера ИК1-3 для исследования диэлектрических свойств материалов (совместно с ЛСМ1)	3 шт.
Измерительная камера ИК1-4 для исследования магнитных свойств материалов (совместно с ЛСМ1)	1 шт.
Измеритель статических характеристик	1 шт.
СЗ-РМ01 (петля гистерезиса ферромагнетика)	1 шт.
СЗ-РМ02 (петля гистерезиса сегнетоэлектрика)	1 шт.
Генератор напряжения высоковольтный ГНВ1	1 шт.
Измерительная камера ИК2-1	1 шт.
Техническое описание	1 шт.
Краткое методическое обеспечение	1 CD-ROM.

## 1.2.2. Задание № 2

Изучить назначение, технические данные, указания по эксплуатации приборов, входящих в состав МУК-РМ1.

### 1.2.2.1. Измеритель электропроводности ИЭП1

Внешний вид измерителя ИЭП1 представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид измерителя ИЭП1

#### 1.2.2.1.1. Назначение

Измеритель электропроводности ИЭП1 предназначен для проведения лабораторного практикума по курсам электрорадиоматериалы, физика твердого тела и физические основы электроники в ВУЗах. Прибор может применяться самостоятельно или в составе комплекса МУК-РМ1.

Прибор предназначен для исследования температурной зависимости сопротивления металлических, полупроводниковых и диэлектрических образцов.

Условия эксплуатации - лабораторные:

- Температура окружающей среды от 283 до 308 К (от +10 до +35 °С);
- Относительная влажность до 80% при температуре 298 К (+25 °С);
- Атмосферное давление  $100 \pm 4$  кПа ( $750 \pm 30$  мм рт. ст.);
- Напряжение питающей сети  $220 \pm 20$  В с частотой 50 Гц

#### 1.2.2.1.2. Электрические параметры и характеристики

1. Диапазон измеряемых прибором сопротивлений от 10 до  $10^{13}$  Ом.
2. Диапазон измеряемых сопротивлений при использовании линейной шкалы от 10 до  $10^9$  Ом перекрывается поддиапазонами с верхними пределами  $10^2$ ;  $10^3$ ;  $10^4$ ;  $10^5$ ;  $10^6$ ;  $10^7$ ;  $10^8$ ;  $10^9$  Ом.
3. Диапазон измеряемых сопротивлений при использовании обратно пропорциональной шкалы от  $10^9$  до  $10^{13}$  Ом перекрывается поддиапазонами с нижними пределами  $10^9$ ;  $3 \cdot 10^9$ ;  $10^{10}$ ;  $3 \cdot 10^{10}$ ;  $10^{11}$ ;  $3 \cdot 10^{11}$ ;  $10^{12}$ ;  $3 \cdot 10^{12}$ .
4. При этом падение напряжения на измеряемом объекте при использовании линейной шкалы является функцией показаний прибора, т.е. зависит от сопротивления измеряемого объекта и может изме-

- няться от 0 до 1 В. При использовании обратно пропорциональной шкалы напряжение на измеряемом объекте постоянно и равно 10 В.
5. Основная погрешность прибора при измерении с линейной шкалой, выраженная в процентах от конечного значения установленного поддиапазона измерения, не превышает  $\pm 2,5\%$ .
  6. Основная погрешность прибора при измерении с обратно пропорциональной шкалой, выраженная в процентах от конечного значения установленного поддиапазона измерения, не превышает  $\pm 15\%$ .
  7. Время установления показаний прибора не более:
    - 5 с – при использовании линейной шкалы;
    - 1 мин – при использовании обратно пропорциональной шкалы с нижними пределами  $10^9$ ;  $3 \cdot 10^9$ ;  $10^{10}$ ;  $3 \cdot 10^{10}$ ;
    - 10 мин – использовании обратно пропорциональной шкалы с нижними пределами  $10^{11}$ ;  $3 \cdot 10^{11}$
    - 40 мин – использовании обратно пропорциональной шкалы с нижними пределами  $10^{12}$ ;  $3 \cdot 10^{12}$
  8. Максимальная температура термокамеры 1500 С;
  9. Число каналов измерения – 2;
  10. Прибор позволяет проводить автоматизированный эксперимент с помощью ЭВМ. Связь с ЭВМ осуществляется со скоростью 9600 бод/с через СОМ-порт;
  11. Прибор обеспечивает свои технические характеристики в пределах указанных норм после 5-ти минутного самопрогрева;
  12. Прибор допускает непрерывную работу в течение 8 часов при сохранении своих технических характеристик.

### 1.2.2.1.3. Конструктивные параметры

- Масса прибора не более 6 кг;
- Габаритные размеры прибора 250\*150\*85мм.

### 1.2.2.2. Измеритель ёмкости и индуктивности ЛСМ1

Внешний вид ЛСМ1 представлен на рис. 3.

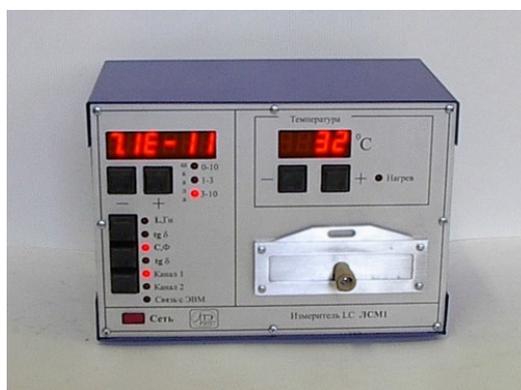


Рис. 3. Внешний вид ЛСМ1

### 1.2.2.2.1. Назначение

Измеритель индуктивности и ёмкости ЛСМ1 предназначен для проведения практикума по курсу электрорадиоматериалы в ВУЗах. Прибор применяется самостоятельно или в составе комплекса МУК-РМ1. Прибор предназначен для исследования температурных зависимостей ёмкости и индуктивности исследуемых образцов.

Условия эксплуатации - лабораторные:

- Температура окружающей среды от 283 до 308 К (от +10 до +35 °С);
- Относительная влажность до 80% при температуре 298 К (+25 °С);
- Атмосферное давление  $100 \pm 4$  кПа ( $750 \pm 30$  мм рт. ст.);
- Напряжение питающей сети  $220 \pm 20$  В с частотой 50 Гц.

### 1.2.2.2.2. Электрические параметры и характеристики

- Частота измерительного сигнала 1000 Гц
- Диапазон измеряемых прибором индуктивностей составляет от  $1.0 \cdot 10^{-4}$  до  $9.9 \cdot 10^{-1}$  Гн. Он перекрывается поддиапазонами с нижними пределами  $1.0 \cdot 10^{-4}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-4}$ ;  $1.0 \cdot 10^{-3}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-3}$ ;  $1.0 \cdot 10^{-2}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-2}$ ;  $1.0 \cdot 10^{-1}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-1}$  Гн.
- Диапазон измеряемых прибором тангенса потерь индуктивности составляет от  $0.1 \cdot 10^{-2}$  до  $9.9 \cdot 10^{-1}$ . Он перекрывается поддиапазонами с верхними пределами  $9.9 \cdot 10^{-2}$  и  $9.9 \cdot 10^{-1}$ . Диапазон измеряемых прибором емкостей составляет от  $1.0 \cdot 10^{-11}$  до  $9.9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Он перекрывается поддиапазонами с нижними пределами  $1.0 \cdot 10^{-11}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-11}$ ;  $1.0 \cdot 10^{-10}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-10}$ ;  $1.0 \cdot 10^{-9}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-9}$ ;  $1.0 \cdot 10^{-8}$ ;  $3.0 \cdot 10^{-8}$  Ф.
- Диапазон измеряемых прибором тангенса диэлектрических потерь составляет от  $0.1 \cdot 10^{-2}$  до  $9.9 \cdot 10^{-1}$ . Он перекрывается поддиапазонами с верхними пределами  $9.9 \cdot 10^{-2}$  и  $9.9 \cdot 10^{-1}$ .
- Основная погрешность прибора при измерениях индуктивности и емкости, выраженная в процентах от конечного значения установленного поддиапазона измерения, не превышает  $\pm 5\%$ .
- Время установления показаний прибора не более 5 с;
- Максимальная температура термокамеры  $150^{\circ}$  С;
- Число каналов измерения – 2;
- Прибор позволяет проводить автоматизированный эксперимент с помощью ЭВМ. Связь с ЭВМ осуществляется со скоростью 9600 бод/с через СОМ-порт;
- Прибор обеспечивает свои технические характеристики в пределах указанных норм после 5-ти минутного самопрогрева;

Прибор допускает непрерывную работу в течение 8 часов при сохранении своих технических характеристик.

### 1.2.2.3. Конструктивные параметры

- Масса прибора не более 6 кг;
- Габаритные размеры прибора 250\*150\*85мм.

### 1.2.2.3. Измеритель статических характеристик ИСХ1

Внешний вид ИСХ1 представлен на рисунке 4.

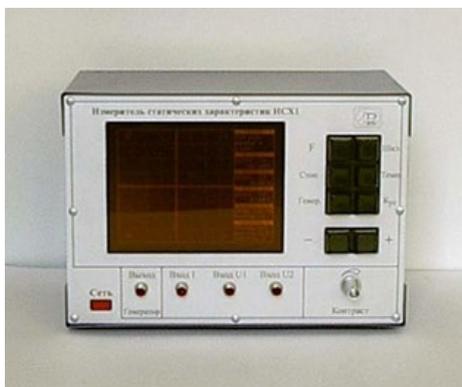


Рис. 4. Внешний вид ИСХ1

#### 1.2.2.3.1. Назначение

Измеритель статических характеристик ИСХ1 предназначен для проведения лабораторного практикума в ВУЗах. Прибор применяется самостоятельно или в составе комплексов МУК-РМ1 (электрорадиоматериалы), МУК-ТТ2 (физика твёрдого тела). Он позволяет исследовать вольт-амперные характеристики различных образцов, входные и выходные характеристики полупроводниковых приборов и др.

Условия эксплуатации - лабораторные:

- Температура окружающей среды от 283 до 308 К (от +10 до +35 0С);
- Относительная влажность до 80% при температуре 298 К (+25 0С);
- Атмосферное давление  $100 \pm 4$  кПа ( $750 \pm 30$  мм рт. ст.);
- Напряжение питающей сети  $220 \pm 20$  В с частотой 50Гц.

#### 1.2.2.3.2. Электрические параметры и характеристики

1. Прибор имеет следующий функциональный состав:
  - 1 управляемый генератор напряжения;
  - 1 измеритель тока (канал I);
  - 2 измерителя напряжения (каналы U1 и U2);
  - 1 терморегулятор.
2. Прибор обеспечивает следующие режимы работы:
  - $I=F(U1)$ ;
  - $U1=F(U2)$ ;

- $U_2=F(I)$ .
- 3. Диапазоны измерения:
  - амплитуды переменного напряжения каналов  $U_1$  и  $U_2$  от  $25 \cdot 10^{-3}$  до 40В;
  - амплитуды переменного тока канала  $I$  от 1 мкА до 40 мА;
- 4. Значения коэффициентов отклонений:
  - каналов  $U_1$  и  $U_2$  – 25 мВ/дел., 50 мВ/дел., 0,1 В/дел., 0,25 В/дел., 0,5 В/дел., 1 В/дел., 2,5 В/дел., 5 В/дел., 10 В/дел;
  - канала  $I$  – 10 мА/дел., 1 мА/дел., 100 мкА/дел., 10 мкА/дел., 1 мкА/дел.
- 5. Активное входное сопротивление каналов  $U_1$  и  $U_2$  не менее 1 МОм;
- 6. Вход канала  $I$  – дифференциальный;
- 7. Максимальное симфазное напряжение канала  $I$  – 10В;
- 8. Шунты канала  $I$ : 1 Ом, 10 Ом, 100 Ом, 1 кОм, 10 кОм;
- 9. Выходная частота задающего генератора – 50 Гц;
- 10. Форма сигнала генератора :синус или треугольник;
- 11. Максимальная амплитуда сигнала генератора – 14 В;
- 12. Терморегулятор – 25...120°C;
- 13. Размер экрана 115x85 мм;
- 14. Предел допускаемой основной погрешности при отображении сигнала, не более 10% от предела измерения;
- 15. Защита по напряжению и току при неправильно выбранных пределах.

#### 1.2.2.3.3. Конструктивные параметры

- Масса прибора не более 3 кг;
- Габаритные размеры прибора 250\*150\*85мм.

#### 1.2.2.4. Генератор напряжения высоковольтный ГНВ1

Внешний вид генератора ГНВ1 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид ГНВ1

### 1.2.2.4.1. Назначение

Генератор напряжения высоковольтный ГНВ1 предназначен для проведения практикума по курсу "Электрорадиоматериалы" в ВУЗах. Прибор может использоваться совместно с измерительной камерой ИК2-1 для определения пробойных напряжений воздуха при различной конфигурации электродов. Прибор применяется в составе модульного учебного комплекса МУК-РМ1.

### 1.2.2.4.2. Основные характеристики прибора

- Выходное регулируемое напряжение, не более 20 кВ;
- Выходной ток, не более 200 мкА;
- Напряжение пульсаций, не более 10%

## 1.2.3. Изучить назначение, состав и параметры стенов с объектами исследования, входящих в состав МУК-РМ1

### 1.2.3.1. Лабораторный стенд СЗ-РМ01

Внешний вид стенда СЗ-РМ01 представлен на рис. 6.

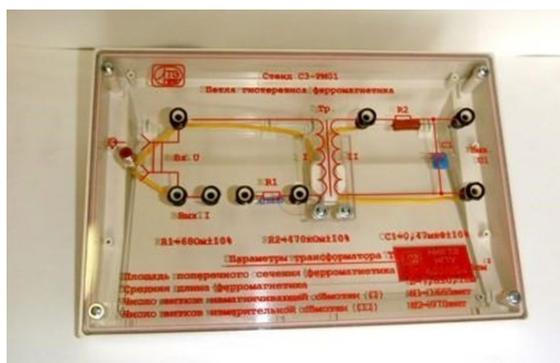


Рис. 6. Внешний вид стенда СЗ-РМ01

### 1.2.3.1.1. Назначение

Стенд СЗ-РМ01 "Петля гистерезиса ферромагнетика" предназначен для проведения практикума в ВУЗах по курсам радиоматериалы и физики. Применяется в составе модульно-учебного комплекса МУК-РМ01

### 1.2.3.1.2. Состав стенда

Стенд содержит следующие элементы:

1. Два постоянных резистора:
  - $R1 = 68 \text{ Ом} \pm 10\%$ ;
  - $R2 = 470 \text{ кОм} \pm 10\%$ ;
2. Конденсатор  $C1 = 0.47 \text{ мкФ} \pm 10\%$ ;
3. Трансформатор  $Tr$ , имеющий следующие характеристики:
  - Средняя длина сердечника  $l = 7.8 \pm 0.1 \text{ см}$ ;

- Площадь поперечного сечения  $S = 0.64 \pm 0.05 \text{ см}^2$ ;
- Число витков первичной обмотки  $N1 = 1665 \text{ вит.}$ ;
- Число витков вторичной обмотки  $N2 = 970 \text{ вит.}$

### 1.2.3.1.3. Конструктивные параметры

- Масса стенда не более 1 кг;
- Габаритные размеры прибора 265\*180\*90мм.

### 1.2.3.3. Лабораторный стенд СЗ-РМ02

#### 1.2.3.3.1. Назначение

Стенд "Сегнетоэлектрик" СЗ-РМ02 предназначен для проведения практикума в ВУЗах по курсам радиоматериалы и физики. Применяется в составе модульно-учебного комплекса МУКРМ1 совместно с прибором ИСХ1. Его внешний вид представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид СЗ-РМ02

#### 1.2.3.3.2. Состав стенда

Стенд содержит следующие элементы:

1. Два постоянных резистора:
  - $R1 = 47 \text{ кОм} \pm 10\%$ ;
  - $R2 = 470 \text{ кОм} \pm 10\%$ ;
2. Конденсаторы:
  - $C1 = 1 \text{ мкФ} \pm 10\%$ ;
  - $C2 = 0.01 \text{ мкФ} \pm 10\%$ ; сегнетоэлектрический (ВК2-4).

#### 1.2.3.3.3. Конструктивные параметры

- Масса стенда не более 1 кг;
- Габаритные размеры прибора 265\*180\*90мм.

## 1.2.4. Ознакомиться с измерительными камерами, входящими в состав МУК-РМ1

### 1.2.4.1. Измерительная камера ИК1-1

#### "Электропроводность металлов и полупроводников"

Измерительная камера ИК1-1 предназначена для проведения практикума по курсу "Электрорадиоматериалы" в ВУЗах. Камера применяется в составе модульного учебного комплекса МУК-РМ1 совместно с измерителем электропроводности ИЭП1. Камера содержит 2 исследуемых образца из следующего перечня материалов: медь, константан, нихром, вольфрам, германий, полупроводниковый терморезистор ММТ-1. Ее внешний вид представлен на рис. 8.

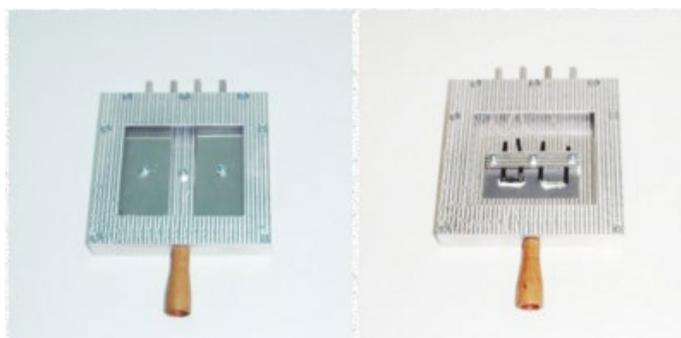


Рис. 8. Внешний вид ИК1-1

### 1.2.4.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ КАМЕРА ИК1-2

#### "Электропроводность твердых диэлектриков"

Измерительная камера ИК1-2 предназначена для проведения практикума по курсу "Электрорадиоматериалы" в ВУЗах. Камера применяется в составе модульного учебного комплекса МУК-РМ1 совместно с измерителем электропроводности ИЭП1.

В камере может быть установлен один из следующих твердых диэлектриков: стеклотекстолит, текстолит, гетинакс. Внешний вид камеры представлен на рис. 9.



Рис. 9. Внешний вид ИК1-2

### 1.2.4.3. Измерительная камера ИК1-3

#### для исследования диэлектрических свойств материалов

Измерительная камера ИК1-3 предназначена для проведения практикума по курсу "Электрорадиоматериалы" в ВУЗах. Камера применяется в составе модульного учебного комплекса МУК-РМ1 совместно с измерителем электропроводности ЛСМ1. С помощью измерительной камеры ИК1-3 можно исследовать температурную зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь твердых диэлектриков.

В камере может быть установлен один из следующих материалов: стеклотекстолит, текстолит, гетинакс. Исследуемый образец выполнен в виде плоского конденсатора с графитовыми электродами.

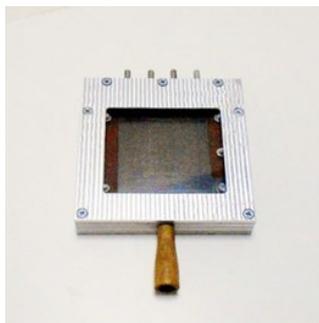


Рис. 10. Внешний вид ИК1-3

### 1.2.4.4. Измерительная камера ИК2-1

#### "Определения пробойных напряжений воздуха при различной конфигурации электродов"

Измерительная камера ИК2-1 предназначена для проведения практикума по курсу "Электрорадиоматериалы" в ВУЗах. Камера применяется в составе модульного учебного комплекса МУК-РМ1 совместно с генератором высоковольтного напряжения ГНВ1. Она изображена на рис. 11.



Рис. 11. Внешний вид ИК2-1

Камера предназначена для измерения расстояний напряжения пробоя между электродами различной конфигурации.

#### **1.2.4.4.1. Основные характеристики прибора**

- Входное напряжение, не более 20 кВ;
- Входной ток, не более 200 мкА.

### **1.3. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА**

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

### **1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ**

1. Каково назначение и состав комплекса МУК-РМ1?
2. Расскажите о назначении, параметрах и характеристиках:
  - измерителя электропроводимости ИЭП1;
  - измерителя ёмкости и индуктивности ЛСМ1;
  - измерителя статических характеристик ИСХ1;
  - генератора напряжения ГНВ1.
3. Каково назначение и состав стендов:
  - СЗРМ01;
  - СЗРМ02?
4. Расскажите о назначении, составе и характеристиках измерительных камер:
  - ИК1-1;
  - ИК1-2;
  - ИК1-3;
  - ИК2-1.

## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

### **2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

#### **2.1.1. Цель работы**

Определение электрического сопротивления некоторых металлов и сплавов, расчет температурного коэффициента сопротивления.

#### **2.1.2. Содержание работы**

Основным содержанием работы является: изучение природы электрической проводимости металлов и сплавов; измерение сопротивлений меди и константана; экспериментальное исследование и анализ температурных зависимостей сопротивлений указанных материалов; определение температурного коэффициента сопротивления.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

#### **2.1.3. Указания по технике безопасности**

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

### **2.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению**

#### **2.2.1. Задание № 1**

Ознакомиться с физической природой электропроводности металлов. В заготовку отчета занести выражение для электропроводности и температурную зависимость удельного сопротивления металлов.

##### **2.2.1.1. Методические указания по выполнению задания**

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 33 – 38; [2], с. 40 – 49; [3], с. 7 – 12.

В основе классической электронной теории лежит представление о металлах, как о системах, построенных из положительных атомных остовов – ионов, находящихся в среде свободных коллективизированных электронов. Согласно этой теории, электроны в металлах ведут себя как электронный газ, которому приписываются свойства идеального газа, то есть свободные электроны

двигаются хаотично со средней скоростью теплового движения  $\bar{u}$  и сталкиваются с ионами. При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике кроме теплового движения электронов возникает их упорядоченное направленное движение (дрейф) со средней скоростью  $\bar{V}$ , то есть возникает электрический ток. Плотность тока в проводнике определяется выражением:

$$J = en\bar{V} \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация электронов, равная концентрации атомов;  $\bar{V}$  – среднее значение скорости дрейфа.

После преобразований эта формула приобретает вид:

$$J = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_0 \bar{u}} E = \gamma E, \quad (2)$$

где  $\bar{l}$  – средняя длина свободного пробега электронов (путь, пройденный электроном между двумя столкновениями);  $m_0$  – масса электрона;  $\bar{u}$  – средняя скорость теплового движения;  $\gamma$  – удельная проводимость (величина обратная удельному сопротивлению  $\gamma = \frac{1}{\rho}$ );  $E$  – напряженность электрического поля.

Таким образом, плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля, то есть выражение (2) является аналитическим выражением закона Ома. Из выражения (2) следует, что величина удельного электрического сопротивления равна

$$\rho = m_0 \bar{u} / (e^2 n \bar{l}), \quad (3)$$

Классическая электронная теория объясняет существование электрического сопротивления металлов, законы Ома и Джоуля - Ленца. Однако в некоторых случаях эта теория приводит к выводам, находящимся в противоречии с опытом. Основной недостаток классической теории заключается в предположении о том, что электронный газ является невырожденной системой. В таких системах в каждом энергетическом состоянии может находиться любое число электронов, и все электроны проводимости принимают независимое участие в создании электрического тока. Квантовая теория основана на принципе Паули, согласно которому в каждом электрическом состоянии может находиться только один электрон. В процессе электропроводности принимают участие не все свободные электроны, а только небольшая часть их, имеющая энергию, близкую к энергии Ферми (фермиевские электроны). Такие системы называют вырожденными. В рамках квантовой теории выражение для удельной проводимости имеет вид

$$\gamma = \frac{e^2 n^{2/3} \bar{l}}{h} \left( \frac{8\pi}{3} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где  $h$  – постоянная Планка.

Концентрация электронов в чистых металлах различается незначительно, температурное изменение концентрации также очень мало. Поэтому проводимость определяется в основном средней длиной свободного пробега, которая зависит от температуры. В чистых металлах с идеальной кристаллической решеткой единственной причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, являются тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки, амплитуда которых возрастает с ростом температуры. Это, в свою очередь, усиливает рассеяние электронов и вызывает рост удельного сопротивления.

Средняя длина свободного пробега электронов определяется выражением

$$\bar{l} = \frac{k_{\text{упр}}}{2\pi NkT}, \quad (5)$$

где  $k_{\text{упр}}$  – коэффициент упругой связи, которая стремится вернуть атом в положение равновесия;  $N$  – число атомов в единице объема;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

После подстановки (5) в (4) получим, что удельное сопротивление металлов линейно увеличивается с температурой.

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{(\sqrt{3\pi})^{2/3} h N k T}{e^2 n^{2/3} k_{\text{упр}}}, \quad (6)$$

Как показывает эксперимент, линейная аппроксимация зависимости  $\rho(T)$ , как правило, справедлива при температурах от комнатных до температур, близких к точке плавления. В области низких температур теория предсказывает степенную зависимость  $\rho \sim T^5$ , температурный интервал, в котором наблюдается резкая степенная зависимость, бывает очень небольшим.

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один градус называют температурным коэффициентом удельного сопротивления

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}, \quad (7)$$

Положительный знак  $\alpha_\rho$  соответствует случаю, когда удельное сопротивление возрастает при повышении температуры. У большинства металлов при комнатной температуре  $\alpha_\rho = 0,004 \text{ K}^{-1}$ .

Типичная кривая изменения удельного сопротивления металла в зависимости от температуры представлена на рис. 12.

В реальных металлах причинами рассеяния электронов являются не только тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решетки, но и статические дефекты структуры. Отсюда вытекает *правило Маттиссена* об аддитивности удельного сопротивления

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \quad (8)$$

То есть полное удельное сопротивление металла есть сумма удельного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на тепловых колебаниях атомов в узлах решетки, и *остаточного удельного сопротивления*, обусловленного рассеянием электронов на статических дефектах структуры. Рассеяние на дефектах не зависит от температуры, исключение составляют сверхпроводящие металлы, в которых сопротивление исчезает ниже некоторой критической температуры.

Наиболее существенный вклад в остаточное сопротивление вносит *рассеяние на примесях*, которые всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнения, либо в виде легирующего элемента. Следует заметить, что любая примесная добавка приводит к повышению  $\rho$ , даже если она обладает повышенной проводимостью по сравнению с основным металлом.

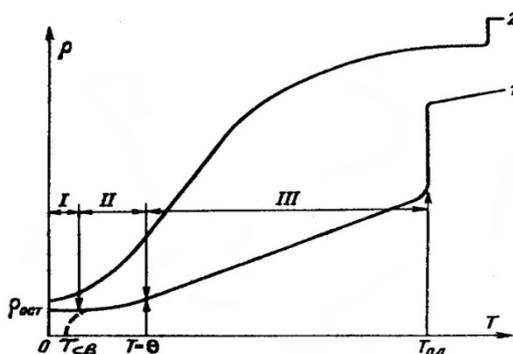


Рис. 12. Зависимости удельного сопротивления металлов от температуры: 1 – типичные температурные зависимости для большинства металлов (I – узкая область сверхпроводимости; II – переходная область быстрого роста; III – линейный участок;  $T_{св}$  – температура перехода в сверхпроводящее состояние;  $T = \Theta$  – температура перехода от участка II к участку III;  $T_{пл}$  – температура плавления); 2 – для некоторых переходных и редкоземельных металлов

Так, введение в медный проводник 0,01 ат. доли примеси серебра вызывает увеличение удельного сопротивления меди на  $0,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Экспериментально установлено, что при малом содержании примесей удельное сопротивление возрастает пропорционально концентрации примесных атомов.

### 2.2.2. Задание № 2

Изучить вопросы электропроводности сплавов. Занести в отчет правило Маттиссена, правило Курнакова – Нордгейма и зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента удельного сопротивления медно-никелевого сплава от состава.

#### 2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Ознакомьтесь с материалом [2], с. 47 – 49; [3], с. 15 – 18 и обратите внимание на то, что возрастание удельного сопротивления наблюдается не только при наличии в металле примесей и дефектов, но и при сплавлении двух металлов, если они образуют твердый раствор. При их образовании сохраняется кристаллическая решетка металла-растворителя, изменяется лишь постоянная решетки, но атомы компонентов распределяются по ее узлам беспорядочно. Некоторые металлы с одинаковыми кристаллическими структурами смешиваются в любой пропорции, то есть образуют системы непрерывных твердых растворов, растворимость других ограничена. Наличие атомов разных видов лишает решетку идеальной периодичности и приводит к сильному рассеянию электронов, в этом случае сопротивление сплава сильно возрастает. Как и в случае металлов, полное удельное сопротивление сплава по правилу Маттиссена можно выразить в виде двух слагаемых:

$$\rho_{\text{спл}} = \rho_T + \rho_{\text{ост}}, \quad (9)$$

где  $\rho_T$  – сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки;  $\rho_{\text{ост}}$  – добавочное (остаточное) сопротивление, связанное с рассеянием электронов на неоднородностях структуры сплава.

Специфика твердых растворов состоит в том, что  $\rho_{\text{ост}}$  может во много раз превышать  $\rho_T$

Для многих двухкомпонентных сплавов изменение  $\rho_{\text{ост}}$  в зависимости от состава хорошо описывается параболической зависимостью вида

$$\rho_{\text{ост}} = CX_A X_B = CX_B (1 - X_B), \quad (10)$$

где  $C$  – константа, зависящая от природы сплава;  $X_A$  и  $X_B$  – концентрации компонентов А и В в сплаве.

Соотношение (10) получило название *правила Курнакова - Нордгейма*. Из него следует, что в бинарных твердых растворах А – В  $\rho_{ост}$  увеличивается как при добавлении атомов В к металлу А, так и при добавлении атомов А к металлу В, причем это изменение характеризуется примерно симметричной кривой. Остаточное сопротивление достигает своего максимального значения при  $X_A = X_B = 0,5$ .

Чем больше удельное сопротивление сплава, тем меньше его температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha_\rho$ . Это объясняется тем, что в твердых растворах  $\rho_{ост}$ , как правило, существенно превышает  $\rho_T$  и не зависит от температуры. Иногда  $\alpha_\rho$  сплавов может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения. Отмеченные аномалии отчетливо проявляются в медно-никелевых сплавах (рис. 13, кривая 2).

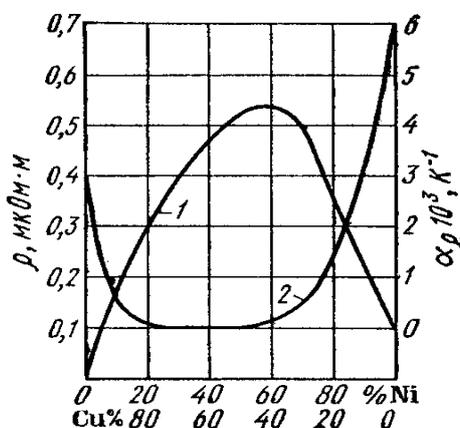


Рис. 13. Зависимость удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента удельного сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от состава

Эти особенности объясняются тем, что у сплавов изменение  $\rho$  вызывается не только изменением подвижности носителей заряда как в чистых металлах, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

Некоторые сплавы имеют тенденцию образовывать *упорядоченные структуры*, если выдержаны определенные пропорции в составе. Причина упорядочения заключается в

более сильном химическом взаимодействии разнородных атомов по сравнению с атомами одного сорта. Например, в системе Cu – Au, упорядочение наблюдается в составах CuAu и Cu<sub>3</sub>Au. Образование упорядоченных структур сопровождается снижением удельного сопротивления твердого раствора, причем весьма существенным.

В том случае, когда компоненты бинарной системы не обладают взаимной растворимостью в твердом состоянии, структура застывшего после кристаллизации сплава представляет собой *механическую смесь двух фаз*. Удельное сопротивление таких гетерофазных сплавов в первом приближении линейно изменяется с изменением состава, то есть возрастает пропорционально содержанию металла с большим значением  $\rho$ . В таких сплавах не наблюдается искажение кристаллической решетки.

Коэффициент  $\alpha$  для металлов положителен, почти не меняется с температурой. Заметим, что зависимость нельзя экстраполировать до абсолютного нуля температур, при стремлении к которому сопротивление обычных металлов (не сверхпроводников) стремится к некоторой конечной величине, обусловленной наличием примесей и дефектов решетки.

Температурные коэффициенты для чистых металлов всегда больше, чем для сплавов из этих металлов (см. табл. 2). Температурные коэффициенты сплавов могут быть близки к нулю, а в некоторых случаях могут принимать даже отрицательные значения.

Таблица 2

Параметры металлов

Металлы и сплавы	Удельное сопротивление $\rho$ , мкОм·м	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$ , К <sup>-1</sup>
Серебро	0.015	$4.1 \cdot 10^{-3}$
Золото	0.023	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	0.026	$4.1 \cdot 10^{-3}$
Медь	0.017	$4.3 \cdot 10^{-3}$
Железо	0.097	$6.2 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	0.055	$5.0 \cdot 10^{-3}$
Нихром	1–1.2	$(1-2) \cdot 10^{-4}$
Константан	0.45–0.52	$(5-25) \cdot 10^{-6}$
Манганин	0.42–0.48	$(5-30) \cdot 10^{-6}$

### 2.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Что такое электропроводность, дрейфовая скорость, подвижность и длина свободного пробега носителей заряда? Как они связаны между собой?
2. Чем обусловлен электрический ток в металлах, сплавах и полупроводниках?

3. Приведите выражение для удельной проводимости чистых металлов.
4. Нарисуйте и проанализируйте типичную температурную зависимость удельного сопротивления металлов.
5. Объясните зависимость удельного сопротивления сплавов от состава и температуры.
6. В чем заключаются правила Маттиссена и Курнакова – Нордгейма?

## 2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

При выполнении работы используются приборы и оборудование, входящие в состав комплекса МУК-РМ1.

Таблица 3

Используемое оборудование

Модульный учебный комплекс МУК-РМ1		
Измеритель электропроводности ИЭП1		1 шт.
Измерительная камера ИК1-1 для измерения сопротивления металлических и полупроводниковых образцов		1 шт. и более

В ходе выполнения лабораторной работы исследуются температурная зависимость сопротивления чистых металлов и сплавов. Измерение сопротивления производится с помощью прибора ИЭП1. В состав этого прибора входит термостатированная печь, в которую может быть помещена измерительная кассета ИК1-1 с исследуемыми образцами. Измерительная кассета содержит по два исследуемых образца (мотки проволоки) из следующего перечня материалов: медь, вольфрам, константан, нихром.

По произведённым измерениям можно произвести расчет:

- удельной электропроводности, зная геометрические размеры образцов;
- ТКС исследуемых материалов.
- Работа может быть выполнена как в ручном варианте, так и с применением ПК.

### 2.4.1. Задание № 1

Изучить порядок работы с приборами и подготовить их к работе. Исследование зависимости сопротивления проводниковых материалов от температуры проводятся с помощью прибора ИЭП1 (рис. 14). Он содержит термокамеру, терморегулятор и измеритель сопротивлений в диапазоне  $10 \dots 10^{13}$  Ом.



Рис. 14. Внешний вид ИЭП1

Применяемый в приборе метод измерения сопротивлений основан на сравнении измеряемого сопротивления и образцового сопротивления с помощью операционного усилителя, охваченного глубокой обратной связью (рис. 15).

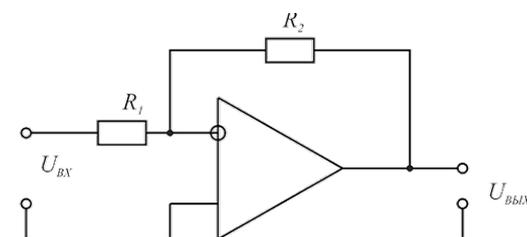


Рис. 15. Схема, описывающая метод измерения

В приборе имеются два диапазона измерений и используются две шкалы – линейная и обратно пропорциональная. Измерения сопротивлений в диапазоне  $10^2 \dots 10^6$  Ом проводятся по линейной шкале, а в диапазоне  $10^7 \dots 10^{13}$  Ом – по обратно пропорциональной шкале.

На передней панели прибора расположены:

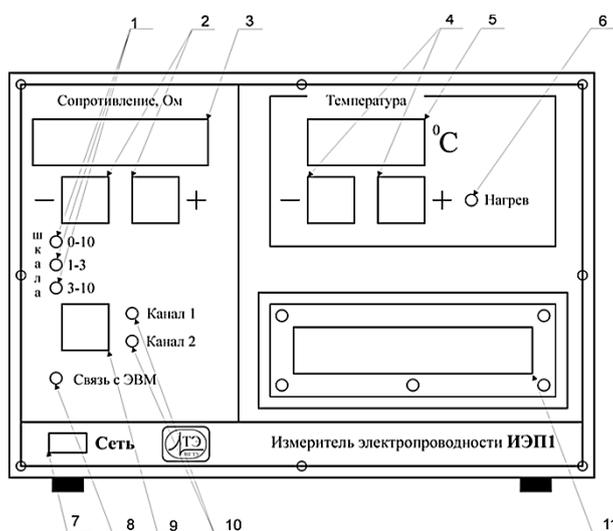


Рис. 16. Основные органы управления ИЭП1: 1 - индикатор шкалы; 2 - кнопки выбора поддиапазона; 3 - индикатор результата измерения; 4 - кнопки выбора температуры; 5 - индикатор температуры; 6 - индикатор нагрева; 7 - кнопка выключателя “Сеть”; 8 - индикатор связи с ЭВМ; 9 - кнопка переключения канала; 10 - индикатор выбора канала; 11 – термокамера

Для включения прибора необходимо нажать кнопку 7 “Сеть” (рис. 16), при этом загорится индикатор результата измерения 3, индикатор выбора температуры 5, индикатор выбора канала 10.

Исследуемые образцы находятся в измерительной кассете ИК1. Для ее установки в прибор необходимо поднять шторку 11, установить кассету с образцами в термокамеру прибора до упора. При этом шторка должна опуститься.

Кнопками 2 устанавливается требуемый диапазон измерений.

Кнопкой 9 устанавливается требуемый канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10.

С помощью кнопок 4 устанавливается требуемое значение температуры термокамеры. При первом нажатии кнопки на индикаторе 5 высветится установленное значение температуры. При повторном нажатии кнопки произойдет коррекция устанавливаемой температуры. Через 2 секунды после завершения установки индикатор 5 перейдет в режим отображения текущей температуры.

Для отключения терморегулятора необходимо установить температуру менее 30<sup>0</sup>С. При этом на экране высветится сообщение “**OFF**”.

*Примечание:* При работе прибора на индикаторе 1 могут отображаться следующие сообщения: “L” – измеряемое сопротивление ниже выбранного диапазона; “H” – измеряемое сопротивление выше выбранного диапазона.

Для исследуемых в работе образцов, имеющих сопротивление ниже 10<sup>6</sup> Ом, измерения проводятся по линейной шкале. Для этого в приборе реализована схема рис. 15.

Источник опорного напряжения  $U_{ВХ}$  и образцовый резистор образуют искусственный генератор тока, а измеряемое сопротивление включается в цепь обратной связи.

Измеряемое сопротивление определяется по формуле:

$$R_2 = \frac{R_{ВЫХ} R_1}{U_{ВХ}}$$

где  $R_2$  – измеряемое сопротивление, Ом;

$R_1$  – сопротивление образцового резистора;

$U_{ВЫХ}$  – выходное напряжение усилителя;

$U_{ВХ}$  – входное напряжение с источника сигнала.

Согласно ГОСТ Р 8625-2006 температурный коэффициент сопротивления металлического терморезистора  $\alpha$  определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 * 100}, \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что для определения температурного коэффициента сопротивления металла необходимо знать сопротивление металла  $R_0$

при 0 °С и при 100 °С. Вначале измеряют сопротивление металла при комнатной температуре  $R_k$ , затем нагревают металл и проводят измерения его сопротивления при соответствующих температурах. Строят график зависимости сопротивления металла от его температуры (рис. 17). Согласно формуле (11), этот график имеет вид прямой линии, продолжение которой (экстраполяция) пересекает ось ординат в точке  $R_0$ .

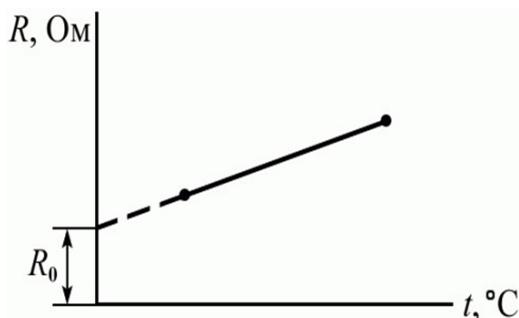


Рис. 17. График зависимости сопротивления металла от его температуры

Включите кнопку “Сеть” 7 (рис. 16), кнопкой 9 установить требуемый канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10. Сопротивление первого материала отображается по каналу 1. Сопротивление второго материала отображается по каналу 2. Кнопками 2 установите требуемый диапазон сопротивления. Измерять величины исследуемых сопротивлений необходимо при комнатной температуре.

#### 2.4.2. Задание № 2

Измерить величины сопротивлений образцов меди и константана при комнатной температуре. Рассчитать значения удельных сопротивлений материалов по формуле (12).

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (12)$$

где  $R$  – сопротивление;  
 $S$  – поперечное сечение;  
 $l$  – длина образца.

Сравнить полученные результаты с данными табл. 2.

#### 2.4.3. Задание № 3

Снимите зависимость  $R$  от температуры. Для этого с помощью кнопок 4 установите требуемое значение температуры термокамеры. Измерения сопротивлений производите по следующему температурному ряду: комнатная, 40, 60, 80, 100°С. Рекомендуется соблюдать интервал между измерениями 10 мин для стабилизации показаний прибора при нагреве образца.

#### 2.4.4. Задание № 4

Построить графики зависимости  $R(t)$ , определите температурные коэффициенты сопротивления  $\alpha$  исследованных материалов. Сравните полученные результаты с данными табл. 2.

### 2.5 .УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

### 2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Объясните методику измерения  $R$  и снятия зависимости  $R(t)$  с помощью прибора ИЭП1 и измерительной камеры ИК1-1.
2. Как определяется величина удельного сопротивления  $\rho$  материалов, в каких единицах измеряется?
3. Какой материал имеет бóльшую величину удельного сопротивления: медь или константан и почему?
4. Что называют температурным коэффициентом удельного сопротивления? Чему он равен для большинства металлов и как определяется?
5. Почему электропроводность металлов и сплавов падает с ростом температуры?
6. Как можно использовать зависимость электропроводности металлов и сплавов от температуры? Приведите примеры.

### **3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

##### **3.1.1. Цель работы**

Определение сопротивления, удельной проводимости и её зависимости от температуры полупроводниковых материалов. Установление основных электрофизических характеристик и типа материалов.

##### **3.1.2. Содержание работы**

Основным содержанием работы является: изучение природы электрической проводимости полупроводников; измерение сопротивлений, экспериментальное исследование и анализ температурных зависимостей удельных проводимостей указанных материалов; определение ширины запрещенной зоны, собственная концентрация носителей заряда, концентрации легирующей примеси, установление типа полупроводника.

##### **3.1.3. Указания по технике безопасности**

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

#### **3.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**

##### **3.2.1. Задание № 1**

Ознакомиться с классификацией, характерными особенностями и основными электрофизическими свойствами полупроводниковых материалов.

##### **3.2.1.1. Методические указания**

Для выполнения задания следует изучить материал [1], с. 67-91; [2], с. 27-39, 52-75; [3], с. 91-146.

Важнейшими материалами, которые наиболее широко применяются в электротехнике, являются полупроводники. Полупроводники представляют собой многочисленный класс материалов, в состав которого входят сотни разнообразных соединений. В него входят сотни разнообразных соединений. Полупроводниковыми свойствами обладают как неорганические, так и органические вещества, кристаллические и аморфные, твердые и жидкие, немагнитные и магнитные. Все это многообразие различных веществ объединено общим свойством – способностью сильно изменять свои электрические свойства под влиянием небольших внешних энергетических воздействий. Основу современной электроники составляют неорганические кристаллические полупроводники.

Полупроводниковые свойства проявляют 12 химических элементов, находящихся в середине периодической системы Менделеева (табл. 4)

По совокупности электрофизических свойств, отработанности технологических процессов, количеству и номенклатуре выпускаемых приборов кремний и германий занимают ведущее место среди полупроводниковых материалов. Используемые в практике полупроводники могут быть подразделены на простые (образованы атомами одного химического элемента) и сложные (образованы атомами двух или большего числа химических элементов). Простые полупроводники представлены в табл. 4. Сложными полупроводниками являются соединения элементов различных групп таблицы Менделеева, соответствующие общим формулам  $A^{IV}B^{IV}$  (SiC),  $A^{III}B^{V}$  (InSb, GaAs, GaP),  $A^{II}B^{VI}$  (CdS, ZnSe), а также некоторые оксиды и вещества сложного состава.

Таблица 4

Свойства простых полупроводников

Элемент	Ширина запрещенной зоны $\Delta E_g$ при 300 К, эВ	Подвижность $\mu_n/\mu_p$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Собственная концентрация носителей заряда $n_{0i}$ , $\text{см}^{-3}$
Бор	1.6...1.9	1 / 150	—
Углерод (алмаз)	5.5	1800 / 1400	—
Кремний	1.12	1400 / 500	$10^{10}$
Германий	0.665	3900 / 1900	$2.5 \cdot 10^{13}$
Олово ( $\alpha$ -Sn)	0.09	0.11...2.7 / 0.2...3.6	$4.2 \cdot 10^{19}$
Фосфор	1.5	220 / 350	—
Мышьяк	1.2	40...500 / 50...1200	$2.16 \cdot 10^{20}$
Сурьма	0.12	2400 / 1300	$5.6 \cdot 10^{15}$
Сера	2.5	7.5/10	—
Селен	1.8	—/40	$10^{14}$
Теллур	0.36	1100/650	—

### 3.2.2. Задание № 2

Изучить механизм электропроводности полупроводников. Рассмотреть температурные зависимости концентрации носителей заряда и проводимости для собственных и примесных полупроводников. В заготовку отчета занести и проанализировать температурную зависимость удельной проводимости полупроводника.

#### 3.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует проработать материал [2], с. 49 – 52; [3], с. 68 – 76.

Общие представления зонной теории твердого тела указывают на то, что для полупроводников характерно наличие не очень широкой запрещенной зоны на энергетической диаграмме  $\Delta E_g$  (см. табл. 4). Это приводит к тому, что при некоторой температуре из-за теплового возбуждения будет наблюдаться наличие свободных носителей как в зоне проводимости (электроны), так и в валентной зоне (дырки). Так как при каждом акте возбуждения в полупроводнике одновременно создаются два носителя заряда противоположных знаков, то общее число носителей будет в два раза больше числа электронов в зоне проводимости:

$$n_0 = p_0 = n_0 + p_0 = 2n_0, \quad (13)$$

Такой полупроводник называется собственным, так как он не имеет примесей, влияющих на его электропроводность.

В производстве большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники, в которых присутствие примеси приводит к изменению электропроводности полупроводника. По типу носителя заряда, появляющегося в полупроводнике из-за примесного атома, все примеси подразделяются на донорные и акцепторные. Сами полупроводниковые материалы подразделяются на электронные (полупроводник n-типа) и дырочные (полупроводник p-типа) по типу основных носителей заряда в объеме вещества (рис. 18).

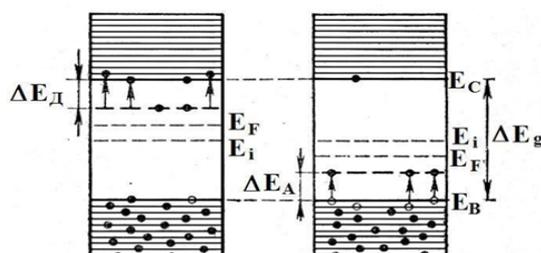


Рис. 18. Распределение энергетических уровней в полупроводниках

Как и в металлах, в полупроводниках под действием внешнего электрического поля носители заряда приобретают некоторую скорость направленного движения (скорость дрейфа) и создают электрический ток, плотность которого определяется выражением (1) (см. л.р. №12).

Отношение средней скорости дрейфа к напряженности электрического поля называют *подвижностью* носителей заряда  $\mu$

$$\mu = \bar{V} / E, \quad (14)$$

В полупроводниках следует различать подвижность электронов  $\mu_n$  и подвижность дырок  $\mu_p$ . С учетом этого выражение (13) приобретает вид

$$J = eE(n_0\mu_n + p_0\mu_p), \quad (15)$$

где  $n_0$  и  $p_0$  – равновесные концентрации электронов и дырок в полупроводнике, а удельная проводимость равна соответственно

$$\gamma = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p), \quad (16)$$

Таким образом, проводимость полупроводников решающим образом зависит от концентрации и подвижности носителей, которые, в свою очередь, зависят от температуры.

Анализ выражения (16) показывает, что зависимость удельной проводимости от температуры определяется двумя факторами: влиянием температуры на концентрацию носителей и на их подвижность. Оценим вклад каждого из этих компонентов.

Выражение для концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике имеет вид

$$n_i = p_i = (N_C \cdot N_B)^{1/2} \cdot \exp(-\Delta\mathcal{E} / 2kT), \quad (17)$$

где  $N_C$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, энергия которых приведена ко дну зоны проводимости;  $N_B$  – эффективная плотность состояний в валентной зоне, энергия которых приведена к потолку валентной зоны ( $\mathcal{E}_B$ );  $\Delta\mathcal{E}$  – ширина запрещенной зоны.

Для графического изображения температурных зависимостей  $n_i$  и  $p_i$  выражение (16) удобно представить в виде:

$$\ln n_i = \ln p_i = \ln(N_C \cdot N_B)^{1/2} - \Delta\mathcal{E} / 2kT, \quad (18)$$

Произведение  $N_C \cdot N_B$  является слабой функцией от температуры, поэтому зависимость логарифма концентрации носителей от обратной температуры близка к линейной, причем наклон прямой характеризует ширину запрещенной зоны собственного полупроводника.

В примесных полупроводниках температурные зависимости равновесных концентраций носителей заряда имеют аналогичный вид. В полупроводнике n-типа концентрация электронов равна

$$\ln n_0 = \ln(N_C \cdot N_D)^{1/2} - \Delta\mathcal{E}_D / 2kT, \quad (19)$$

где  $N_D$  – эффективная плотность состояний на донорных уровнях;  $\Delta\mathcal{E}_D$  – энергия ионизации доноров.

В полупроводнике  $p$ -типа концентрация дырок

$$\ln p_0 = \ln(N_B \cdot N_A)^{1/2} - \Delta\mathcal{E}_A / 2kT, \quad (20)$$

где  $N_A$  – эффективная плотность состояний на акцепторных уровнях;  $\Delta\mathcal{E}_A$  – энергия ионизации акцепторов.

В полупроводниках подвижность носителей меняется при изменении температуры сравнительно слабо (по степенному закону:  $\mu \sim T^{3/2}$  в области низких температур и  $\mu \sim T^{-3/2}$  при повышенных температурах). В то же время, как следует из соотношений (17) – (20), концентрация носителей заряда зависит от температуры очень сильно (по экспоненциальному закону). Таким образом, температурная зависимость удельной проводимости как собственных, так и примесных полупроводников определяется в основном температурной зависимостью концентрации носителей. Поэтому качественный характер зависимости  $\gamma(T)$  аналогичен зависимости  $n(T)$  и  $p(T)$  (рис. 19).

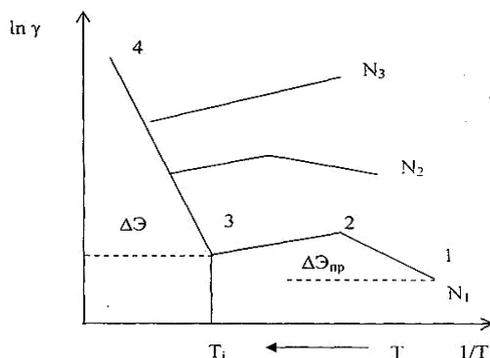


Рис. 19. Типичные температурные зависимости удельной проводимости полупроводника при различной концентрации примесей:  $N_1 < N_2 < N_3$

В области низких температур (участок 1 – 2) увеличение удельной проводимости с ростом температуры обусловлено возрастанием концентрации носителей заряда, поставляемых примесными атомами (донорами или акцепторами).

Наклон прямой на этом участке характеризует энергию активации примесей  $\Delta\mathcal{E}_{np}$  ( $\Delta\mathcal{E}_D$  или  $\Delta\mathcal{E}_A$ ). В процессе дальнейшего нагревания при некоторой температуре, соответствующей точке 2, все электроны с примесных уровней оказываются выброшенными в зону проводимости в случае электронного ( $n$ ) и в запрещенную зону в случае дырочного ( $p$ ) полупроводников. При этом вероятность ионизации собственных атомов полупроводника еще мала.

Поэтому в достаточно широком температурном интервале (участок 2 – 3) концентрация носителей заряда остается постоянной и поведение удельной проводимости определяется температурной зависимостью подвижности. Этот

участок принято называть областью истощения примесей. При относительно высоких температурах (участок 3 – 4) доминирующую роль начинают играть переброшенные электроны через запрещенную зону, т.е. происходит переход в область собственной электропроводности, где концентрация электронов равна концентрации дырок, а крутизна кривой определяет ширину запрещенной зоны  $\Delta\mathcal{E}$ . Для этой области  $\gamma_i = en_i(\mu_n + \mu_p)$ . С увеличением концентрации примеси участки кривых, соответствующих примесной проводимости, смещаются вверх, при этом уменьшается энергия ионизации примесей, т.е.  $\Delta\mathcal{E}_{np1} > \Delta\mathcal{E}_{np2} > \Delta\mathcal{E}_{np3}$ . Чем больше концентрация примесей, тем выше температура их истощения. При достаточно высокой концентрации примеси ( $N_3$ ) их энергия ионизации обращается в ноль, так как образовавшаяся примесная зона перекрывается зоной проводимости. Такой полупроводник является вырожденным. У вырожденного полупроводника концентрация носителей заряда не зависит от температуры, а температурная зависимость удельной проводимости в области примесной электропроводности подобна температурному изменению удельной проводимости металлов. Поэтому вырожденные полупроводники иногда называют полуметаллами.

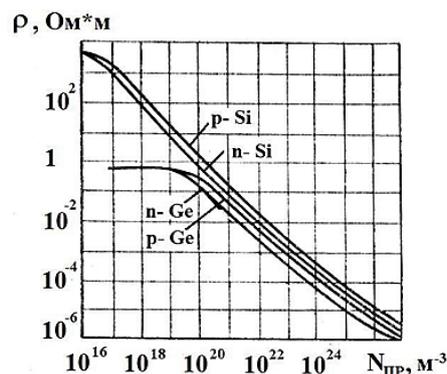


Рис. 20. Зависимость удельного сопротивления от концентрации примесных атомов

Помимо температурной зависимости удельной проводимости практический интерес представляет также зависимость удельного сопротивления полупроводника от концентрации примесных атомов (рис. 20). Эта зависимость устанавливается экспериментальным путем и используется при расчетах количества легирующей примеси, необходимой для выращивания полупроводникового монокристалла с требуемым удельным сопротивлением.

### 3.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие вещества называются полупроводниками? В чем заключается особенность их свойств?
2. Какие функции выполняют полупроводниковые материалы в РЭС?
3. материалы в РЭС?

4. Как классифицируются полупроводниковые материалы по структуре и по составу?
5. Какие полупроводники называют собственными, а какие примесными? Какие примеси являются донорными, а какие акцепторными? Приведите примеры.
6. Какие полупроводники называются электронными, какие дырочными? Дайте определение основных и неосновных носителей заряда.
7. Что такое ширина запрещенной зоны, в каких единицах она измеряется? Как влияет ширина запрещенной зоны на рабочую температуру ПП изделия?
8. Что такое подвижность и концентрация носителей заряда и как они зависят от температуры? Как влияет подвижность носителей на частотные свойства ПП изделия?
9. Объясните температурную зависимость удельной проводимости полупроводников?
10. Какие полупроводниковые материалы на основе химических соединений и их растворов вы знаете? Каковы их основные свойства и области применения?
11. Расскажите о перспективных полупроводниковых материалах. Укажите область их потенциального применения.

### **3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**

При выполнении работы используются приборы и оборудование, входящие в состав комплекса МУК-РМ1.

Таблица 5

Состав комплекса МУК-РМ1

Модульный учебный комплекс МУК-РМ1		
Измеритель электропроводности ИЭП1		1 шт.
Измерительная камера ИК1-1 для измерения сопротивления металлических и полупроводниковых образцов		1 шт. и более

#### **3.4.1. Краткое описание работы**

В ходе выполнения лабораторной работы исследуются температурная зависимость сопротивления германия и полупроводникового терморезистора ММТ1. Измерение сопротивления производится с помощью прибора ИЭП1. В состав этого прибора входит термостатированная печь, в которую может быть помещена измерительная камера ИК1-1 с исследуемыми образцами.

По произведённым измерениям можно произвести расчет:

- ТКС исследуемых материалов;

- удельной электропроводности германия, зная его геометрические размеры.

Работа может быть выполнена как в ручном варианте, так и с применением ПК.

### 3.4.2. Задание № 1

Изучить порядок работы с приборами и подготовить их к работе. Для выполнения задания следует изучить раздел 2.4.1 л.р. №12 настоящих методических указаний.

### 3.4.3. Задание № 2

Измерить величины сопротивления образцов германия и терморезистора ММТ1 с помощью прибора ИЭП1 при комнатной температуре. Рассчитать значения удельных сопротивлений и проводимостей материалов.

Для этого установите картридж в прибор. Включите кнопку 7 “Сеть” (рис. 15, л.р. №12). Кнопкой 9 установите 1-й канал для измерения (по первому каналу расположен исследуемый полупроводник). Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10. Кнопками 2 установите требуемый диапазон сопротивления.

Удельная проводимость определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RS}, \quad (21)$$

где R – сопротивление;

S – поперечное сечение;

l – длина образца.

### 3.4.4. Задание № 3

Снять зависимость R от температуры  $R=f(t)$ , рассчитать  $\rho$  и  $\gamma$  при разных температурах. Результаты измерений занести в табл. 6. Для этого с помощью кнопок 4 установите требуемое значение температуры термокамеры. Измерения сопротивлений производите по следующему температурному ряду: начальная, 40, 60, 80, 100°C. Рекомендуется соблюдать интервал между измерениями 10 мин для стабилизации показаний прибора при нагреве образца.

Таблица 6

Таблица для записи результатов измерений

t, °C	20	40	60	80	100
R, Ом					
$\rho$ , Ом·м					
$\gamma$ , (Ом·м) <sup>-1</sup>					
T, К					

1/ T, K <sup>-1</sup>					
-----------------------	--	--	--	--	--

### 3.4.5. Задание № 4

Построить зависимости  $\ln(\gamma) = f(1/T)$ . Рассчитать коэффициент температурной чувствительности В, ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ , собственную концентрацию носителей заряда  $n_0$ . Оценить концентрацию легирующей примеси  $N_{np}$  и определить тип полупроводникового материала.

$\Delta E$  следует определить на высокотемпературном участке зависимости  $(\gamma) = f(1/T)$ , взяв две последние точки (60-100°C).

При относительно высоких температурах  $\gamma$  полу-проводника в области соответственной проводимости равна:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (22)$$

откуда ширина запрещенной зоны:

$$\Delta E = 2k \frac{d(\ln \gamma)}{d(1/T)}, \quad (23)$$

По табл. 4 найти материал, величина  $\Delta E$  которого лежит наиболее близко к расчетному значению.

В собственном полупроводнике  $n_0 = p_0$ , поэтому (16) приобретает вид:

$$\gamma = en_0(\mu_n + \mu_p), \quad (24)$$

Для определения собственной концентрации носителей следует, используя зависимость  $\ln(\gamma) = f(1/T)$ , определить минимум удельной проводимости  $\gamma_{\min}$  и воспользоваться формулой (24). Данные для подвижностей взять из табл. 4. По рис. 20 оценить концентрацию легирующей примеси.

### 3.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и

графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

### 3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Объясните методику измерений  $R$  и снятия зависимостей  $R=f(t)$  с помощью прибора ИЭП1 и измерительной камеры ИК1-2.
2. Как определяются  $\rho$  и  $\gamma$ , в каких единицах они измеряются?
3. Объясните экспериментальные зависимости. Почему электропроводность  $\ln(\gamma) = f(1/T)$  полупроводников растет при увеличении температуры?
4. Что такое ширина запрещенной зоны полупроводника и энергия активации примесей? В каких единицах они измеряются и на какие параметры полупроводников влияют?
5. Какие методы измерения ширины запрещенной зоны полупроводников Вы знаете?
6. Что такое коэффициент температурной чувствительности полупроводника  $B$ , как он определяется, в каких единицах измеряется?
7. Расскажите о методике определения собственной концентрации носителей и концентрации легирующей примеси из ваших данных.
8. Как можно использовать зависимость проводимости от температуры? Приведите примеры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника [Текст]: учеб. пособие / К.С. Петров. – СПб.: Питер, 2006. – 522 с.
2. Балашов Ю.С. Физические основы функционирования интегральных устройств микроэлектроники [Текст]: учеб. пособие / Ю.С. Балашов, М.И. Горлов.-2-е изд., перераб. и доп. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. – 187 с.
3. Чернышов А.В. Радиоматериалы. Ч. 2: Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы [Текст]: учеб. пособие / А.В. Чернышов, А.С. Бадаев. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. – 235 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15	
ИЗУЧЕНИЕ МОДУЛЬНОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МУК-РМ1	
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ	
«РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ».....	3
1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ .....	3
1.1.1. Цель работы.....	3
1.1.2. Содержание работы .....	3
1.1.3. Указания по технике безопасности.....	3
1.2 ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ .....	3
1.2.1. Задание № 1 .....	3
1.2.1.1. Назначение.....	3
1.2.2. Задание № 2 .....	5
1.2.2.1. Измеритель электропроводности ИЭП1 .....	5
1.2.2.1.1. Назначение.....	5
1.2.2.1.2. Электрические параметры и характеристики .....	5
1.2.2.1.3. Конструктивные параметры.....	6
1.2.2.2. Измеритель ёмкости и индуктивности ЛСМ1 .....	6
1.2.2.2.1. Назначение.....	7
1.2.2.2.2. Электрические параметры и характеристики .....	7
1.2.2.2.3. Конструктивные параметры.....	8
1.2.2.3. Измеритель статических характеристик ИСХ1 .....	8
1.2.2.3.1. Назначение.....	8
1.2.2.3.2. Электрические параметры и характеристики .....	8
1.2.2.3.3. Конструктивные параметры.....	9
1.2.2.4. Генератор напряжения высоковольтный ГНВ1 .....	9
1.2.2.4.1. Назначение.....	10
1.2.2.4.2. Основные характеристики прибора .....	10
1.2.3. Изучить назначение, состав и параметры стендов с объектами	
исследования, входящих в состав МУК-РМ1 .....	10
1.2.3.1. Лабораторный стенд СЗ-РМ01 .....	10
1.2.3.1.1. Назначение.....	10

1.2.3.1.2. Состав стенда.....	10
1.2.3.1.3. Конструктивные параметры.....	11
1.2.3.3. Лабораторный стенд СЗ-РМ02 .....	11
1.2.3.3.1. Назначение.....	11
1.2.3.3.2. Состав стенда.....	11
1.2.3.3.3. Конструктивные параметры.....	11
1.2.4. Ознакомиться с измерительными камерами, входящими в состав МУК-РМ1 .....	12
1.2.4.1. Измерительная камера ИК1-1	
"Электропроводность металлов и полупроводников" .....	12
1.2.4.2. Измерительная камера ИК1-2	
"Электропроводность твердых диэлектриков" .....	12
1.2.4.3. Измерительная камера ИК1-3	
для исследования диэлектрических свойств материалов .....	13
1.2.4.4. Измерительная камера ИК2-1	
"Определения пробойных напряжений воздуха при различной конфигурации электродов" .....	13
1.2.4.4.1. Основные характеристики прибора .....	14
1.3. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	14
1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	14
2.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	15
2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ .....	15
2.1.1. Цель работы .....	15
2.1.2. Содержание работы .....	15
2.1.3. Указания по технике безопасности .....	15
2.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению..	15
2.2.1. Задание № 1 .....	15
2.2.1.1. Методические указания по выполнению задания .....	15
2.2.2. Задание № 2 .....	19
2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания .....	19
2.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ .....	21

2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ .....	22
2.4.1. Задание № 1 .....	22
2.4.2. Задание № 2 .....	25
2.4.3. Задание № 3 .....	25
2.4.4. Задание № 4 .....	26
2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	26
2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	26
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	27
3.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ .....	27
3.1.1. Цель работы.....	27
3.1.2. Содержание работы .....	27
3.1.3. Указания по технике безопасности .....	27
3.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ .....	27
3.2.1. Задание № 1 .....	27
3.2.1.1. Методические указания.....	27
3.2.2. Задание № 2 .....	28
3.2.2.1. Методические указания по выполнению задания .....	28
3.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ .....	32
3.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ .....	33
3.4.1. Краткое описание работы.....	33
3.4.2. Задание № 1 .....	34
3.4.3. Задание № 2 .....	34
3.4.4. Задание № 3 .....	34
3.4.5. Задание № 4 .....	35
3.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	35
3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ .....	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	37

# **РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ**

## ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторных работ № 15-17  
для студентов специальности 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»  
очной формы обучения*

**Составитель**

**Бадаев Андрей Станиславович**

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 29.05.2024.

Уч.-изд. л. 2,1.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84