

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 1-2

по дисциплине «Физические основы микро- и

наноэлектроники» по направлениям 211000.62

«Конструирование и технология электронных средств»(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»), 210400.62

«Радиотехника»(профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») и специальности

210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения



Воронеж 2014

Составитель: канд. физ.-мат. наук А.С. Бадаев

УДК 539.2.21.(07)

Методические указания к лабораторным работам № 1-2 по дисциплине «Физические основы микро- и наноэлектроники» по направлениям 211000.62 «Конструирование и технология электронных средств»(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»), 210400.62 «Радиотехника»(профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») и специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.С. Бадаев. Воронеж, 2014. 51 с.

В методических указаниях изучаются модульный учебный комплекс МУК-ФОЭ1, электропроводность твердых тел. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Физические основы микро- и наноэлектроники».

Методические указания предназначены для студентов 2 курса очной формы обучения.

Табл. 1. Ил. 17. Библиогр.: 5 назв.

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. В.И. Митрохин

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.С. Балашов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский
государственный технический
университет», 2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ МОДУЛЬНОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МУК-ФОЭ1 ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1. Цель работы

Ознакомление с назначением, составом и работой модульного учебного комплекса МУК-ФОЭ1 и входящих в его состав приборов и лабораторных стендов.

1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является изучение назначения, технических данных, состава, устройства и принципа работы, указанных по мерам безопасности комплекса МУК-ФОЭ1, генератора напряжений ГНЗ-03а, амперметра-вольтметра АВ1-13, блока управления тиристорами БЛ2-03, стендов с объектами исследования СЗ-ЭЛ01, СЗ-ЭЛ02 и СЗ-ТТ02.

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.

1.3. Указания по технике безопасности

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

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

2.1. Задание №1

Ознакомиться с назначением, составом и работой комплекса МУК-ФОЭ1.

Модульный учебный комплекс МУК-ФОЭ1 разработан и изготовлен НИЛ Техники эксперимента Новосибирского государственного технического университета, ООО «Опытные приборы» г. Новосибирск

НАЗНАЧЕНИЕ

Комплекс МУК-ФОЭ1 предназначен для проведения практикума по физическим основам микро- и нанoeлектроники в высших учебных заведениях (рис. 1).

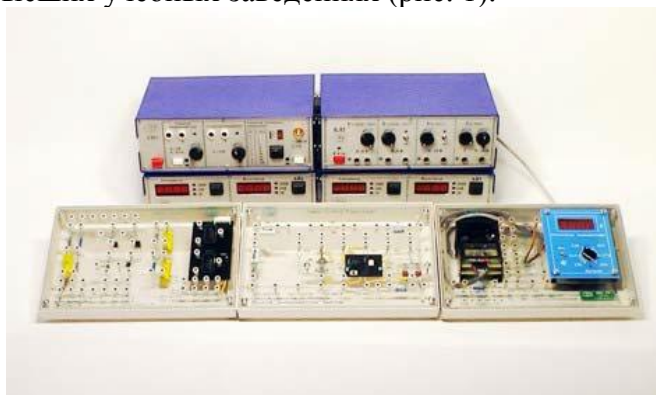


Рис. 1.

Комплекс позволяет проводить лабораторные работы по темам:

- Металлический терморезистор, в диапазоне температур от 290 до 390 К;
- Полупроводниковый терморезистор, в диапазоне температур от 290 до 390 К;
- Исследование температурной зависимости параметров диода, в диапазоне температур от 290 до 390 К;
- Исследование температурной зависимости параметров диода Шоттки, в диапазоне температур от 290 до 390 К;
- Исследование температурной зависимости параметров стабилитрона, в диапазоне температур от 290 до 290 К;
- Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов в схемах с общей базой;
- Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов в схемах с общим эмиттером;
- Малосигнальные параметры и усилительные свойства биполярных транзисторов;
- Динамические свойства биполярных транзисторов;
- Полевой транзистор с управляющим р-п переходом;
- МДП-транзистор;
- Исследование характеристик динистора;
- Исследование характеристик тиристора;
- Исследование характеристик симистора;
- Исследование характеристик оптосимистора;
- Логические элементы.

КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ

- | | |
|---|--------|
| – Амперметр-вольтметр АВ1 | 2 шт. |
| – Генератор многофункциональный ГНЗ | 1 шт. |
| – Блок управления стендом СЗ-ЭЛ02 «тиристор», БЛ2 | 1 шт. |
| – Стенд с объектами исследования СЗ-ЭЛ01 | 1 шт. |
| – Стенд с объектами исследования СЗ-ЭЛ02(тиристоры) | 1 шт. |
| – Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ02 | 1 шт. |
| – Соединительные провода длиной 60 см | 12 шт. |

(штекера Ш1-6, Ш4)	
– Соединительные провода длиной 30 см	8 шт.
(штекера Ш1-6, Ш1-6)	
– Техническое описание	1 шт.
– Краткое методическое обеспечение	1 CD-ROM

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке приборы комплекса перед включением выдерживаются при нормальных условиях не менее двух часов.

3.2. После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте приборы комплекса не менее 12 часов.

3.3 Установка комплекса на рабочее место:

– Установите на рабочем месте розетку с третьим заземляющим проводом (евророзетку).

– Установку комплекса необходимо производить вдали от сильных электромагнитных помех.

2.2 Задание № 2

Изучить назначение, технические данные, устройство и принцип работы, указания по эксплуатации генератора напряжения ГНЗ-03а, амперметра-вольтметра АВ1-13, блока управления тиристорами БЛ2-03

2.2.1 Генератор напряжений ГНЗ-03а

НАЗНАЧЕНИЕ

Генератор напряжений многофункциональный ГНЗ-03 (в дальнейшем по тексту прибор) предназначен для проведения практикума по курсам физические основы электроники и основы электроники в ВУЗах. Прибор применяется в составе модульных учебных комплексах МУК-ФОЭ

(по физическим основам электроники), МУК-ОЭ (по основам электроники).

Прибор предназначен для:

- Генерации постоянных напряжений с регулируемыми уровнями;
- Генерации постоянного тока с регулируемым уровнем;
- Генерации импульсного напряжения с постоянной амплитудой и изменяемой частотой повторения.

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 ± 4 кПа (750 ± 30 мм рт. ст.);
- Напряжение питающей сети 220 ± 20 В с частотой 50 Гц.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Электрические параметры и характеристики

1^й блок генератора, в режиме генератора постоянного напряжения имеет следующие параметры:

- Выходное регулируемое напряжение $0 \div 5$ В;
- Выходной ток до $20 \text{ мА} \pm 10\%$;
- Внутреннее сопротивление блока $220 \text{ Ом} \pm 10\%$;
- Гальваническая развязка от остальных блоков.

1^й блок генератора, в режиме генератора постоянного тока имеет следующие параметры:

- Выходной регулируемый ток ($0 \div 20$) $\text{мА} \pm 10\%$ на нагрузке 680 Ом ;
- Внутреннее сопротивление блока $430 \text{ кОм} \pm 10\%$.

2^й блок генератора постоянного напряжения имеет следующий параметр:

- Выходное регулируемое напряжение $0 \div 15$ В;
- Выходной ток до 100 мА $\pm 10\%$;
- Внутреннее сопротивление блока около 0 Ом $\pm 10\%$;
- Гальваническая развязка от остальных блоков.

Блок генератора импульсного напряжения имеет следующие параметры:

- Частоты импульсного напряжения имеют 10 фиксированных частот, которые указаны на передней панели прибора ($\pm 10\%$):

–

№	F, кГц
0	1
1	2
2	5
3	10
4	20
5	50
6	100
7	200
8	500
9	1000

- Выбор формы сигнала – меандр, либо синусоидальное напряжение;
- Выходное напряжение импульсов 5 В $\pm 10\%$;
- Внутреннее сопротивление генератора импульсов 30 Ом;
- Амплитудное выходное синусоидальное напряжение 200 мВ $\pm 10\%$;
- Внутреннее сопротивление генератора синусоидального напряжения 27 Ом $\pm 10\%$.

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.

Конструктивные параметры

Масса прибора не более 3 кг;

Габаритные размеры прибора 250*150*85 мм.

СОСТАВ ПРИБОРА

1. Генератор напряжения многофункциональный 1 шт.
2. Техническое описание 1 шт.
3. Кабель сигнальный для ВЧ (BNC – Ш1.6) 1 шт.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Органы управления

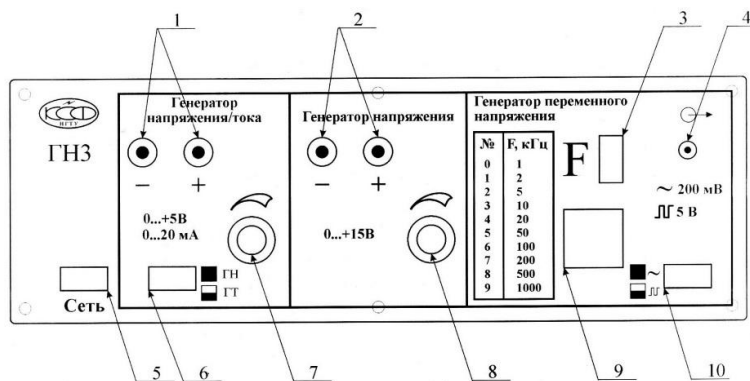


Рис. 2.

Внешний вид прибора представлен на рис. 2.

На передней панели расположены:

1. выходные гнезда 1^{го} блока генератора постоянного напряжения/тока;
2. выходные гнезда 2^{го} блока генератора постоянного напряжения;
3. индикатор номера выбранной частоты;

4. выходное гнездо генератора переменного напряжения;
5. кнопка выключателя «Сеть»;
6. кнопка выбора режима «генератор напряжения»/«генератор тока»;
7. регулятор выходного напряжения/тока 1^{го} блока генератора постоянного напряжения/тока;
8. регулятор выходного напряжения 2^{го} блока генератора постоянного напряжения;
9. кнопка переключения частот;
10. кнопка выбора формы выходного сигнала, генератора переменного напряжения.

Конструкция

Прибор состоит из следующих конструктивных узлов:

- двух съёмных крышек. Нижняя крышка снабжена отверстиями охлаждения и имеет резиновые ножки;
- двух боковых стенок, к которым крепятся швеллеры для крепления печатных плат;
- задней стенки:
 - а) через которую выводится шнур питания;
 - б) на которой расположен винт для крепления на стойке;
 - в) в которой имеется гнездо для подключения стенодов: СЗ-ТТ01(2) (твёрдое тело), СЗ-ОЭ03 (операционный усилитель), СЗ-ЭЛ01 (физические основы микро- и нанoeлектроники).

№ вывода	Наименование
1	+ 5 В
2	0 В
3	+ 23 В
4	- 5 В
5	0 В

– передней панели, на которой выведены органы управления и выходные гнезда.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке прибор перед включением выдерживается при нормальных условиях не менее двух часов.

После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте прибор не менее 12 часов.

Установка прибора на рабочее место:

– Установите на рабочем месте розетку с третьим заземляющим проводом (евророзетку).

– Установку блока необходимо производить вдали от сильных электромагнитных помех.

– Рекомендуется проводить монтаж блока на стойку. Для этого в приборе предусмотрен монтажный винт на задней стенке.

УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

К работе с прибором допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Категорически запрещается работать с прибором со снятым защитным кожухом.

Все ремонтные работы производить при выключенной вилке питания.

Запрещается вставлять и вынимать вилку питания при нажатой кнопке «Сеть».

Запрещается эксплуатация прибора без третьего заземляющего провода в сетевой розетке (евророзетка). Недопустимо использования для заземления труб парового или водяного отопления.

УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Включите кнопку «Сеть» 6 (Рис. 2), при этом загорится индикатор номера выбранной частоты 0, соответствующий частоте 1 кГц генератора переменного напряжения 3. Если необходима другая частота, то её выбор осуществляется кнопкой 9. Нагрузка подключается к гнезду 4. Выбор формы выходного сигнала осуществляется переключателем 10.

Если в лабораторной работе используется источник постоянного напряжения $0 \div 5$ В, то перед включением блока установите в соответствии с выполняемой работой переключатель выбора режима «генератор напряжения»/«генератор тока» в положение «генератор напряжения». Нагрузку подключить к гнездам 1.

Если в лабораторной работе используется источник постоянного тока $0 \div 20$ мА, то перед включением блока установите в соответствии с выполняемой работой переключатель выбора режима «генератор напряжения»/«генератор тока» в положение «генератор тока». Ручкой 7 установите требуемое значение выходного напряжения (тока). Нагрузку подключить к гнездам 1.

Если в лабораторной работе используется источник постоянного напряжения $0 \div 15$ В, то необходимо подключить нагрузку к гнездам 2. Регулировка выходного напряжения осуществляется регулятором 8.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Содержите прибор в чистоте, оберегайте его от воздействия влаги, грязи, пыли, ударов и падений.

Для удаления загрязнений применяйте мягкую ткань, слегка смоченную спиртом (категорически запрещается использовать для этой цели растворители красок и эмалей).

При промывке алюминиевой панели рекомендуется применять моющее средство «Пемолюкс».

2.2.2. Амперметр-вольтметр АВ1-13

НАЗНАЧЕНИЕ

Амперметр-вольтметр АВ1-13 (в дальнейшем по тексту прибор) предназначен для проведения практикумов по курсам физике, электротехники и физическим основам микро- и наноэлектроники. Прибор применяется в составе модульных учебных комплексов МУК-ЭМ (по электричеству и магнетизму), МУК-ТТ1 (по физике твёрдого тела), МУК-ОК (по квантовой оптике), МУК-ЭТ (по электротехнике), МУК-ФОЭ1 (по физическим основам микро- и наноэлектроники).

Прибор предназначен для:

- Измерения постоянного напряжения;
- Измерения амплитуды переменного напряжения;
- Измерения постоянной силы тока;
- Измерения амплитуды переменной силы тока.

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 ± 4 кПа (750 ± 30 мм рт. ст.);
- Напряжение питающей сети 220 ± 20 В с частотой 50 Гц.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Электрические параметры и характеристики

Пределы измерения:

- Пределы измерения постоянного напряжения: $\pm 2\text{В}$, $\pm 20\text{В}$, $\pm 200\text{В}$;
- Пределы измерения амплитуды переменного напряжения: 2В, 20В, 200В;

- Пределы измерения постоянной силы тока: $\pm 20\text{мкА}$, $\pm 200\text{мкА}$, $\pm 2000\text{мкА}$, $\pm 20\text{мА}$, $\pm 200\text{мА}$, $\pm 2000\text{мА}$;
- Пределы измерения амплитуды переменной силы тока: 20мкА , 200мкА , 2000мкА , 20мА , 200мА , 2000мА ;
- Индикатор показаний вольтметра 3 $\frac{1}{3}$ разряда (max 1999);
- Индикатор показаний амперметра 3 $\frac{1}{3}$ разряда (max 1999);

Активное входное сопротивление вольтметра при измерении постоянного напряжения не менее 1 МОм;

Входная ёмкость вольтметра при измерении переменного напряжения не более 47 пФ;

Частотный диапазон АВ, не менее 30 кГц;

Падение напряжения в рабочем режиме на входных клеммах амперметра, не превышает 200 мВ;

Предел допускаемой основной погрешности при измерении постоянных величин не более 5 % от предела измерения;

Предел допускаемой основной погрешности при измерении переменных величин, не более 10 % от предела измерения;

Защита по току и напряжению при неправильно выбранных пределах;

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.

Конструктивные параметры

Масса прибора не более 3 кг;

Габаритные размеры прибора 250*180*85 мм.

СОСТАВ ПРИБОРА

1. Амперметр-вольтметр

1 шт.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Органы управления

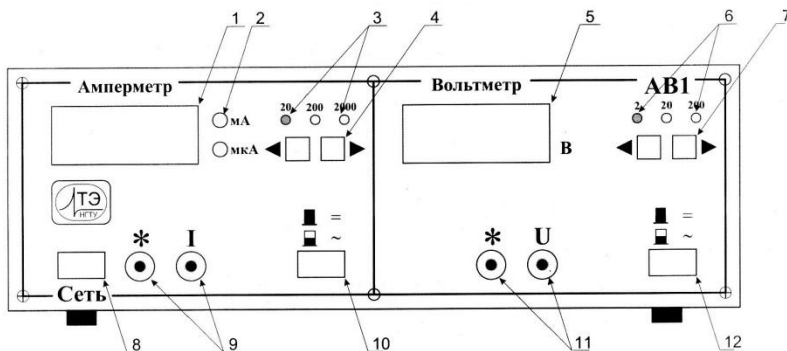


Рис. 3.

На передней панели прибора расположены (Рис. 3):

1. индикатор значения тока;
2. индикатор выбранной размерности измерений амперметра;
3. индикатор выбранного предела измерений амперметра;
4. кнопки переключения пределов измерений амперметра;
5. индикатор значения напряжения;
6. индикатор выбранного предела измерений вольтметра;
7. кнопки переключения пределов измерений вольтметра;
8. кнопка выключателя «Сеть»;
9. входные гнезда измерителя тока;
10. кнопка переключателя постоянный / переменный сигнал амперметра;
11. входные гнезда измерителя напряжения;

12. кнопка переключателя постоянный / переменный сигнал вольтметра.

Конструкция

Прибор состоит из следующих конструктивных узлов:

- двух съёмных крышек. Нижняя крышка снабжена отверстиями охлаждения и имеет резиновые ножки;
- двух боковых стенок, к которым крепятся швеллеры для крепления печатных плат;
- задней стенки, через которую выводится шнур питания и на которой расположен винт для крепления к задней стойке;
- передней панели, на которой выведены органы управления и выходные гнезда.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке прибор перед включением выдерживается при нормальных условиях не менее двух часов.

После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте прибор не менее 12 часов.

Установка прибора на рабочее место:

- Установите на рабочем месте розетку с третьим заземляющим проводом (евророзетку).
- Установку блока необходимо производить вдали от сильных электромагнитных помех.
- Рекомендуется проводить монтаж блока на стойку. Для этого в приборе предусмотрен монтажный винт на задней стенке.

УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

К работе с прибором допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Категорически запрещается работать с прибором со снятым защитным кожухом.

Все ремонтные работы производить при выключенной вилке питания.

Запрещается вставлять и вынимать вилку питания при нажатой кнопке «Сеть».

Запрещается эксплуатация прибора без третьего заземляющего провода в сетевой розетке (евророзетка). Недопустимо использования для заземления труб парового или водяного отопления.

УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Порядок работы с прибором.

Включите кнопку «Сеть» 8 (Рис. 3). При этом прибор настраивается на измерение максимальных значений тока и напряжения. Выбор диапазона измерения сигнала осуществляется кнопками 4 и 7 соответственно для вольтметра и амперметра; переключение пределов производится от максимального к минимальному и обратно, и отображается индикаторами 3 и 6, а также запятыми на индикаторах 1 и 5. Переключение диапазонов измерения тока «мА» и «мкА» осуществляется автоматически от кнопок 4.

Для измерения тока внешняя исследуемая цепь подключается к клеммам 9. А для измерения напряжения – к клеммам 11.

При измерении постоянных токов кнопка 10 должна быть отжата, а при измерении переменных нажата.

При измерении постоянных напряжений кнопка 12 должна быть отжата, а при измерении переменных нажата.

При измерении сигналов отрицательной полярности индуцируется знак “ - ”.

При возникновении перегрузки в измерительном блоке гаснут все индикаторы, кроме первого и загорается знак “1”. В вольтметре при перегрузке также мигают все запя-

тые. При этом необходимо переключить его на более высокий предел измерения.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Содержите прибор в чистоте, оберегайте его от воздействия влаги, грязи, пыли, ударов и падений.

Для удаления загрязнений применяйте мягкую ткань, слегка смоченную спиртом (категорически запрещается использовать для этой цели растворители красок и эмалей).

При промывке алюминиевой панели рекомендуется применять моющее средство «Пемолюкс».

2.2.3 Блок управления тиристорами БЛ2-03

НАЗНАЧЕНИЕ

Блок тиристор БЛ2-03 (в дальнейшем по тексту прибор) предназначен для генерации испытательных сигналов, необходимых для исследования физических свойств: динистора, тиристора, симистора, оптосимистора в курсе физических основ микро- и нанoeлектроники в ВУЗах. Прибор применяется в составе модульного лабораторно-учебного комплекса МУК-ФОЭ (по физическим основам микро- и нанoeлектроники), совместно со стендом СЗ-ЭЛ02 «Тиристор».

Прибор позволяет получать:

- Постоянное анодное напряжение;
- Постоянное управляющее напряжение;
- Импульсное анодное напряжение;
- Импульсное управляющее напряжение.

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 ± 4 кПа (750 ± 30 мм рт. ст.);
- Напряжение питающей сети 220 ± 20 В с частотой 50 Гц.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Электрические параметры и характеристики

Генератор постоянного анодного напряжения имеет следующие параметры:

- Выходное регулируемое напряжение, U_a , пост. $\pm (0 \div 21)$ В;
- Выходное сопротивление 15 Ом.

Генератор постоянного управляющего напряжения имеет следующие параметры:

- Выходное регулируемое напряжение, $U_{\text{управ.}}$, пост. $\pm (0 \div 9)$ В;
- Выходное сопротивление 150 Ом.

Генератор импульсного анодного напряжения имеет следующие параметры:

- Выходное регулируемое напряжение, U_a , имп. $\pm (0 \div 21)$ В;
- Выходное сопротивление 30 Ом;
- Длина импульса анодного напряжения (рис. 4.а) 400 мкс;
- Регулируемая задержка между анодными импульсами (рис. 4.а) $(5 \div 150)$ мкс.

Генератор импульсного управляющего напряжения имеет следующие параметры:

- Выходное регулируемое напряжение, $U_{\text{управ.}}$, имп. $\pm (0 \div 9)$ В;
- Выходное сопротивление 300 Ом;

- Длина импульса управляющего 10 мкс;
- напряжения (рис. 4.б)
- Задержка между подачей анодного 100 мкс.
- и управляющего импульсов (рис. 4.б)

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.

Конструктивные параметры

Масса прибора не более 3 кг;

Габаритные размеры прибора 250*180*85 мм.



Рис. 4. Временные диаграммы генераторов импульсов.

СОСТАВ ПРИБОРА

- | | |
|---|-------|
| 1. Блок управления стендом СЗ-ЭЛ02
«Тиристор», БЛ2 | 1 шт. |
| 2. Техническое описание | 1 шт. |

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ

ПРИБОРА

Органы управления

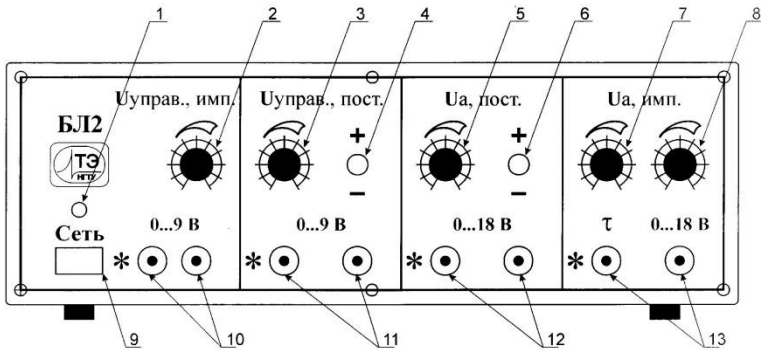


Рис. 5.

Внешний вид прибора представлен на рис. 5.

На передней панели генератора расположены:

1. индикатор включения «Сеть»;
2. регулятор амплитуды выходных импульсов, для управляющего электрода;
3. регулятор выходного постоянного напряжения, для управляющего электрода;
4. переключатель полярности, для анодного электрода;
5. регулятор выходного постоянного напряжения, для анодного электрода;
6. переключатель полярности, для анодного электрода;
7. регулировка задержки между анодными импульсами;
8. регулятор амплитуды выходных импульсов, для анодного электрода;
9. кнопка выключателя «Сеть»;
10. выходные гнезда импульсного напряжения, для управляющего электрода;
11. выходные гнезда постоянного напряжения, для управляющего электрода;
12. выходные гнезда постоянного напряжения, для анодного электрода;

13. выходные гнезда импульсного напряжения, для анодного электрода.

Конструкция

Прибор состоит из следующих конструктивных узлов:

- двух съёмных крышек. Нижняя крышка снабжена отверстиями охлаждения и имеет резиновые ножки;
- двух боковых стенок, к которым крепятся швеллеры для крепления печатных плат;
- задней стенки, через которую выводится шнур питания и на которой расположен винт для крепления к задней стойке;
- передней панели, на которой выведены органы управления и выходные гнезда.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке прибор перед включением выдерживается при нормальных условиях не менее двух часов.

После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте прибор не менее 12 часов.

Установка прибора на рабочее место:

- Установите на рабочем месте розетку с третьим заземляющим проводом (евророзетку).
- Установку блока необходимо производить вдали от сильных электромагнитных помех.
- Рекомендуется проводить монтаж блока на стойку. Для этого в приборе предусмотрен монтажный винт на задней стенке.

УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

К работе с прибором допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Категорически запрещается работать с прибором со снятым защитным кожухом.

Все ремонтные работы производить при выключенной вилке питания.

Запрещается вставлять и вынимать вилку питания при нажатой кнопке «Сеть».

Запрещается эксплуатация прибора без третьего заземляющего провода в сетевой розетке (евророзетка). Недопустимо использования для заземления труб парового или водяного отопления.

УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Включите кнопку «Сеть» 9 (Рис. 5), при этом загорится индикатор включения «Сеть» 1.

Если используется генератор импульсного управляющего напряжения, то подключите нагрузку к гнездам 10. Регулировка амплитуды осуществляется регулятором 2.

Если используется генератор постоянного управляющего напряжения, то подключите нагрузку к гнездам 11. Регулировка амплитуды осуществляется регулятором 3. Переключатель 4 предназначен для смены полярности.

Если используется генератор постоянного анодного напряжения, то подключите нагрузку к гнездам 12. Регулировка амплитуды осуществляется регулятором 5. Переключатель 6 предназначен для смены полярности.

Если используется генератор импульсного анодного напряжения, то подключите нагрузку к гнездам 13. Регулировка амплитуды осуществляется регулятором 8.

Регулятором 7 осуществляется регулировка задержки между анодными импульсами.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Содержите прибор в чистоте, оберегайте его от воздействия влаги, грязи, пыли, ударов и падений.

Для удаления загрязнений применяйте мягкую ткань, слегка смоченную спиртом (категорически запрещается использовать для этой цели растворители красок и эмалей).

При промывке алюминиевой панели рекомендуется применять моющее средство «Пемолюкс».

2.3. Задание № 3

Изучить назначение, технические данные, состав и указания по эксплуатации лабораторных стендов СЗ-ТТ02-2, СЗ-ЭЛ01, СЗ-ЭЛ02.

2.3.1. Лабораторный стенд СЗ-ТТ02-2

НАЗНАЧЕНИЕ

Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ02-2 предназначен для проведения практикума в ВУЗах по курсам физики, электротехники и физических основ микро- и нанoeлектроники. Применяется в составе модульного учебного комплекса МУК-ТТ, МУК-ЭТ.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Масса стенда не более 1 кг;
Габаритные размеры прибора 180*264*86 мм.

СОСТАВ СТЕНДА

Стенд (рис. 6) содержит группы объектов исследования, имеющих следующие характеристики:

VD1 – Д310 (германиевый диод);

VD2 – КД212 (кремниевый диод);

VD3 – 1N5818 (диод Шоттки);

VD4 – bzx55c3v0 (туннельный стабилитрон (диод Зенера));

VD5 – 2С175Ж (лавинный стабилитрон);

R1 – 700-102ВАА-В00 (платиновый резистор 1 кОм);

R2 – ММТ-1 (полупроводниковый терморезистор 47 кОм);

$R_{огр.} = 680 \text{ Ом} \pm 10\%$;

Возможна поставка стенов с другими марками элементов, но с аналогичными характеристиками.

Все элементы: VD1 ... VD5, R1, R2 расположены на термостатированной площадке.

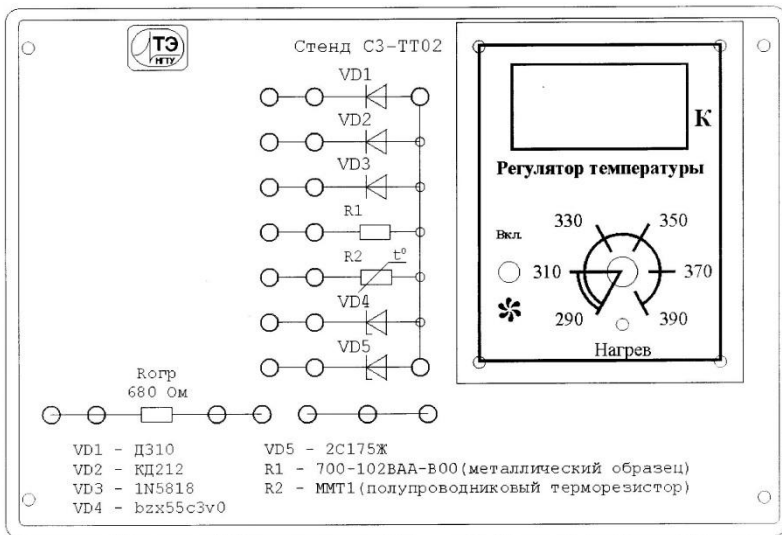


Рис. 6.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке стенд перед включением выдерживается при нормальных условиях не менее двух часов.

После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте прибор не менее 12 часов.

Подключите стенд к гнезду генератора напряжений (ГН1, ГН2, ГН3), расположенном на задней стенке при отключенном приборе. Цоколёвка разъема для подключения к прибору:

№ разъема	Наименование
1	+ 6 (5) В
2	0 В

3	+ 23 В
4	- 6 (5) В
5	0 В

УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Терморегулятор позволяет изменять температуру исследуемых элементов от 290 до 390 К. Индикатор температуры показывает температуру площадки в градусах Кельвина. Установка температуры осуществляется регулятором температуры (риска на ручке для ориентировочной установки температуры). Индикатор нагрева показывает, что идет нагрев. При погасании индикатора нагреватель отключается. Для ускорения остывания элементов, в стенде расположен вентилятор, который включается тумблером.

Внимание: *включение полупроводниковых элементов от генератора напряжения производить только через ограничительный резистор.*

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Содержите стенд в чистоте, оберегайте его от воздействия влаги, грязи, пыли, ударов и падений.

Для удаления загрязнений применяйте мягкую ткань, слегка смоченную спиртом (категорически запрещается использовать для этой цели растворители красок и эмалей).

Рекомендуется проводить обработку поверхности стенда антистатическими растворами для стеклянных и пластиковых поверхностей.

2.3.2. Лабораторный стенд СЗ-ЭЛ01

НАЗНАЧЕНИЕ

Стенд СЗ-ЭЛ01 предназначен для проведения практикума в ВУЗах по курсам электротехники и физических основ микро- и нанoeлектроники. Применяется в составе модульного учебного комплекса серий МУК-Ф0Э.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Масса стенда не более 1 кг;
Габаритные размеры прибора 180*264*86 мм.

СОСТАВ СТЕНДА

Стенд (рис. 7) содержит группы объектов исследования, имеющих следующие характеристики:

– постоянные резисторы:

R1, R3, R4 = 1,5 кОм ± 10%;

R2 = 6,8 кОм ± 10%;

R5 = 68 Ом ± 10%;

R_{огр.} = 560 Ом ± 10%;

– конденсаторы:

C1, C2, C3 = 3,3 мкФ ± 10%;

– транзисторы:

VT1 – КТ819 (кремниевый, биполярный, n-p-n);

VT2 – КТ818 (кремниевый, биполярный, p-n-p);

VT3 – КП302 (кремниевый, планарный полевой с затвором на основе p-n перехода и каналом n-типа);

VT4 – IRFD420 (полевой с изолированным затвором и каналом n-типа);

– логические элементы 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ (КМОП либо ТТЛ).

Возможна поставка стендов с другими марками элементов, но с аналогичными характеристиками.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке стенд перед включением выдерживается при нормальных условиях не менее двух часов.

После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте прибор не менее 12 часов.

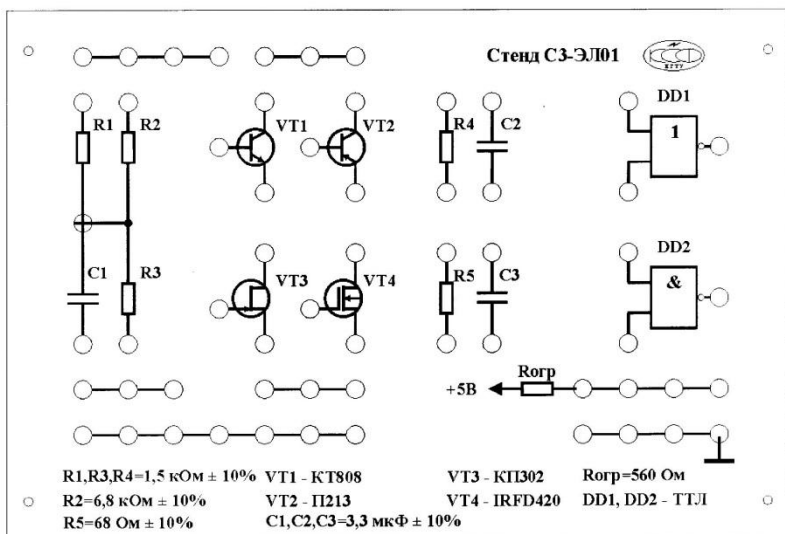


Рис. 7.

Подключите стенд к гнезду генератора напряжений (ГН1, ГН2, ГН3), расположенном на задней стенке при отключенном приборе. Цоколёвка разъема для подключения к прибору:

№ разъема	Наименование
1	+ 6 (5) В
2	0 В
3	+ 23 В
4	- 6 (5) В
5	0 В

УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Включение питания логических элементов производится нажатием кнопки «Сеть» на приборе.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Содержите стенд в чистоте, оберегайте его от воздействия влаги, грязи, пыли, ударов и падений.

Для удаления загрязнений применяйте мягкую ткань, слегка смоченную спиртом (категорически запрещается использовать для этой цели растворители красок и эмалей).

Рекомендуется проводить обработку поверхности стенда антистатическими растворами для стеклянных и пластиковых поверхностей.

2.3.3. Лабораторный стенд СЗ-ЭЛ02

НАЗНАЧЕНИЕ

Стенд СЗ-ЭЛ02 предназначен для проведения практикума в ВУЗах по курсам электротехники и физических основ микро- и нанoeлектроники. Применяется в составе модульного учебного комплекса серий МУК-Ф0Э.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Масса стенда не более 1 кг;
Габаритные размеры прибора 180*264*86 мм.

СОСТАВ СТЕНДА

Стенд (рис. 8) содержит группы объектов исследования, имеющих следующие характеристики:

- диодистор VQ1 – КН102А;
- тиристор VQ2 – КУ202А;
- симистор VQ3 – МАС9;
- оптосимистор VQ4 – МОС3021;
- постоянные резисторы:
 $R_A = 10 \text{ Ом} \pm 10\%$;
 $R_Y = 100 \text{ Ом} \pm 10\%$;
 $R_1 = R_2 = 390 \text{ Ом} \pm 10\%$;

$R_{31} = 10 \text{ Ом} \pm 10\%$;
 $R_{32} = R_{33} = R_{34} = 100 \text{ Ом} \pm 10\%$;
 $R_{35} = 75 \text{ Ом} \pm 10\%$.

Возможна поставка стенов с другими марками элементов, но с аналогичными характеристиками.

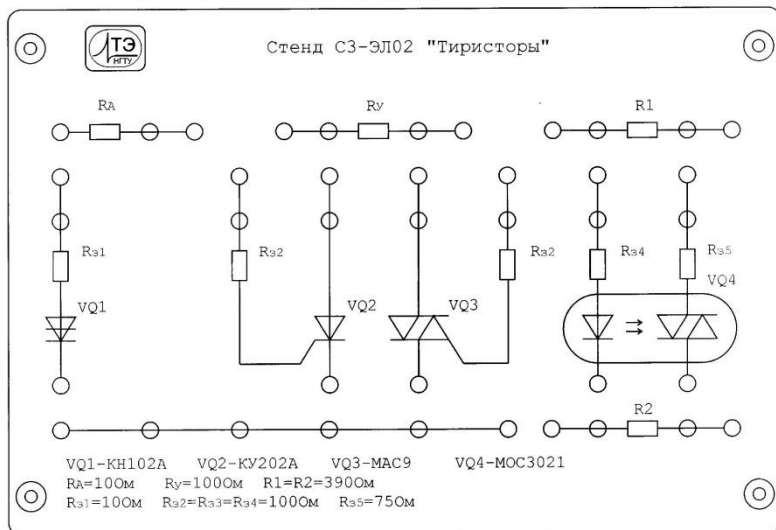


Рис. 8.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

При больших колебаниях температур, при хранении и транспортировке стенд перед включением выдерживается при нормальных условиях не менее двух часов.

После хранения в условиях повышенной влажности выдерживайте прибор не менее 12 часов.

УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Соблюдайте полярность при подключении.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Содержите стенд в чистоте, оберегайте его от воздействия влаги, грязи, пыли, ударов и падений.

Для удаления загрязнений применяйте мягкую ткань, слегка смоченную спиртом (категорически запрещается использовать для этой цели растворители красок и эмалей).

Рекомендуется проводить обработку поверхности стенда антистатическими растворами для стеклянных и пластиковых поверхностей.

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.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Каково назначение и состав комплекса МУК-ФОЭ1?
2. В чём состоит подготовка к работе комплекса?
3. Расскажите о назначении и технических данных генератора ГНЗ-03а.
4. Объясните устройство и принцип работы прибора.
5. Расскажите о порядке работы с генератором.
6. Каковы назначение, технические данные и состав амперметра-вольтметра АВ1-13?

7. Объясните устройство, конструкцию и принцип работы прибора.
8. В чём заключается подготовка к работе и эксплуатация прибора?
9. Для чего предназначен блок БЛ2-03? Привести технические характеристики блока.
10. Объясните устройство и принцип работы прибора.
11. Расскажите про эксплуатацию блока БЛ2-03.
12. Что представляет собой лабораторный стенд СЗ-ТТ02-2?
13. В чём заключаются подготовка к работе и указания по эксплуатации стенда?
14. Каковы назначение, технические данные и состав стенда СЗ-ЭЛ01?
15. Характеристики каких приборов позволяет исследовать стенд СЗ-ЭЛ02?
16. Как осуществляется подготовка к работе, эксплуатация и техническое обслуживание стенда?
17. Расскажите о мерах безопасности при эксплуатации комплекса МУК-ФОЭ1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1. Цель работы

Изучение и анализ температурных зависимостей электропроводности металлического образца – платины и оксидного полупроводника.

1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение природы электрической проводимости металлов и полупроводников; измерение сопротивлений платины и оксидного полупроводника; экспериментальное исследование и анализ температурных зависимостей сопротивлений указанных материалов; определение температурного коэффициента сопротивления металла, коэффициента температурной чувствительности и ширины запрещённой зоны полупроводника.

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.

1.3. Указания по технике безопасности

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

2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ

УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.1. Задание № 1

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

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 движутся 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; γ – 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

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

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

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

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 α_ρ 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. 1.

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 метал-

лы, в которых сопротивление исчезает ниже некоторой критической температуры.

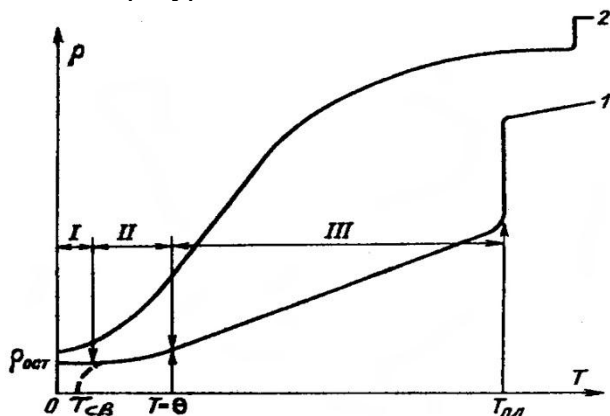


Рис.1. Зависимости удельного сопротивления металлов от температуры: 1 – типичные температурные зависимости для большинства металлов (I – узкая область сверхпроводимости; II – переходная область быстрого роста; III – линейный участок; $T_{св}$ – температура перехода в сверхпроводящее состояние; $T = \Theta$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

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 ρ , даже если она обладает повышенной проводимостью по сравнению с основным металлом. 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. 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.

Методические указания по выполнению задания

Ознакомиться с материалом / 2, с. 47 – 49; 3, с. 15 – 18 / и обратить 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

$$\rho_{снл} = \rho_T + \rho_{осм} \quad (9)$$

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

Специфика твердых растворов состоит в том, что $\rho_{осм}$ может во много раз превышать ρ_T

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

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

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 α_ρ . Это объясняется тем, что в твердых растворах $\rho_{ост}$, как правило, существенно превышает ρ_T и не зависит от температуры. Иногда α_ρ сплавов может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения. Отмеченные аномалии отчетливо проявляются в медно-никелевых сплавах (рис. 2, кривая 2).

Эти особенности объясняются тем, что у сплавов изменение ρ 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

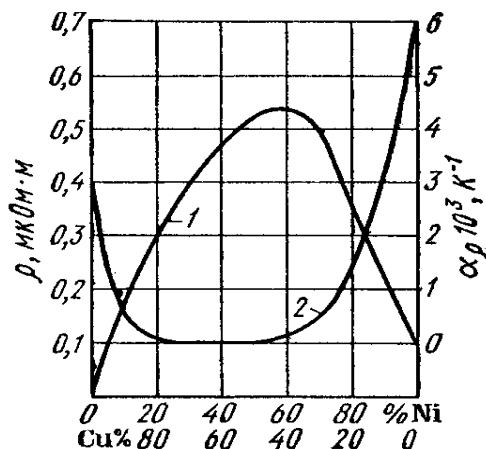


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента удельного сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от состава

более сильном химическом взаимодействии разнородных атомов по сравнению с атомами одного сорта. Например, в системе Cu – Au, упорядочение наблюдается в составах CuAu и Cu₃Au. 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 бóльшим значением ρ . В таких сплавах не наблюдается искажение кристаллической решетки.

2.3. Задание № 3

Изучить механизм электропроводности полупроводников. Рассмотреть температурные зависимости концен-

трации носителей заряда и проводимости для собственных и примесных полупроводников. В заготовку отчета занести и проанализировать температурную зависимость удельной проводимости полупроводника.

Методические указания по выполнению задания

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

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.). Отношение средней скорости дрейфа к напряженности электрического поля называют *подвижностью* носителей заряда μ

$$\mu = \bar{V} / E . \quad (11)$$

В полупроводниках следует различать подвижность электронов μ_n и подвижность дырок μ_p . С учетом этого выражение (1) приобретает вид

$$J = eE(n_0\mu_n + \rho_0\mu_p), \quad (12)$$

где n_0 и ρ_0 – равновесные концентрации электронов и дырок в полупроводнике, а удельная проводимость равна соответственно

$$J = e(n_0\mu_n + \rho_0\mu_p). \quad (13)$$

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

Анализ выражения (13) показывает, что зависимость удельной проводимости от температуры определяется дву-

мя 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

$$n_i = p_i = (N_C \cdot N_B)^{1/2} \cdot \exp(-\Delta\mathcal{E}/2kT), \quad (14)$$

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 (14) удобно представить в виде:

$$\ln n_i = \ln p_i = \ln(N_C \cdot N_B)^{1/2} - \Delta\mathcal{E}/2kT. \quad (15)$$

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

$$\ln n_0 = \ln(N_C \cdot N_D)^{1/2} - \Delta\mathcal{E}_D/2kT, \quad (16)$$

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

В полупроводнике *p*-типа концентрация дырок

$$\ln p_0 = \ln(N_B \cdot N_A)^{1/2} - \Delta\mathcal{E}_A / 2kT, \quad (17)$$

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 (14) – (17), 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. 3).

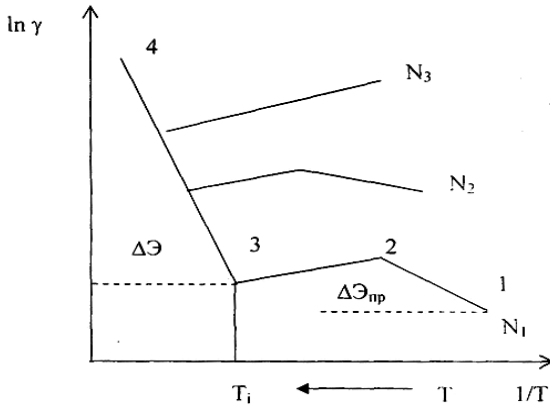


Рис. 3. Типичные температурные зависимости удельной проводимости полупроводника при различной концентрации примесей: $N_1 < N_2 < N_3$

В области низких температур (участок 1 – 2) увеличение удельной проводимости с ростом температуры обу-

словлено 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 перебросы электронов 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 образующаяся 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.

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?

7. Как зависят концентрация и подвижность носителей заряда для собственных и примесных полупроводников?

8. Приведите и объясните температурную зависимость удельной проводимости полупроводника.

9. Какой фактор является определяющим для температурной зависимости удельной проводимости полупроводников, а какой – для металлов?

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1. Задание № 1

Снять ВАХ ($U = f(I)$) металлического образца при различных температурах образца. Рекомендуемые значения температуры $T = 300\text{K}$ и $T = 360\text{K}$. Рекомендуемый диапазон изменения тока $0 - 5$ мА. Построить графики.

Методические указания по выполнению задания

Используя комплекс МУК-ФОЭ1, соберите электрическую схему, представленную на рис. 4. В качестве источника применяется генератор тока, содержащийся в генераторе напряжений ГНЗ. «Звёздочкой обозначен минус соответствующего прибора»

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК-ФОЭ1:

- | | |
|---|-------|
| 1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 | 1 шт. |
| 2. Блок генератора напряжения ГНЗ | 1 шт. |
| 3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ02 | 1 шт. |
| 4. Соединительные провода с наконечниками Ш4-Ш1.6 | 6 шт. |

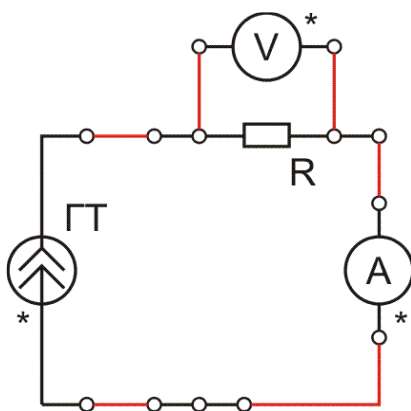


Рис. 4.

В стенде СЗ-ТТ02 в качестве металлического проводника установлен металлический терморезистор (платиновый тонкопленочный резистор R1). Для нахождения сопротивления терморезистора можно воспользоваться методом амперметра-вольтметра по закону Ома.

$$R = \frac{U}{I} \quad (18)$$

Температуру устанавливать ручкой регулятора температуры (работа № 1, рис. 6). Для быстрого охлаждения образца воспользуйтесь вентилятором, установленным в стенде СЗ-ТТ02.

4.2. Задание № 2

Снять зависимость сопротивления металлического терморезистора от температуры $R = f(T)$ при постоянном токе $I = const$. Рекомендуемое значение 1 мА.

4.3. Задание № 3

Рассчитайте по формуле 19 значение температурного коэффициента сопротивления α . По таблице 1 определите материал, из которого сделан терморезистор.

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} . \quad (19)$$

Таблица 1

Металл	$\alpha, K^{-1} \times 10^{-3}$
Медь	4,3
Вольфрам	5,0
Платина	3,9
Железо	6,2
Никель	6,7
Палладий	3,6
Серебро	4,1

4.4. Задание № 4

Снять ВАХ ($U = f(I)$) полупроводникового образца при различных температурах образца. Рекомендуемые значения температуры $T = 300\text{K}$ и $T = 360\text{K}$. Рекомендуемый диапазон изменения тока $0 - 5$ мА. Построить графики.

Методические указания по выполнению задания

Для проведения измерений электрическая схема, представлена на рис. 4. В качестве источника применяется генератор тока, содержащийся в генераторе напряжений ГНЗ. В качестве R следует подключить полупроводниковый образец (полупроводниковый резистор R2, установленный в стенде СЗ-ТТ02-2).

4.5. Задание № 5

Снять зависимость сопротивления полупроводникового образца от температуры $R = f(T)$ при постоянном токе $I = const$ Рекомендуемое значение 1 мА. R определять по формуле (18). Построить график.

4.6. Задание № 6

Рассчитать значение коэффициента температурной чувствительности B, построить зависимость

$$\ln(1/R) = f(1/T)$$

и определить из неё ширину запрещенной зоны полупроводника.

Методические указания по выполнению задания

Коэффициент температурной чувствительности определяется по формуле:

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (20)$$

где R_1 и R_2 – сопротивления полупроводника на линейном участке зависимости $R = f(T)$ при температурах T_1 и T_2 .

Ширина запрещённой зоны и энергия активации примесей находится из температурной зависимости логарифма удельной проводимости. Как видно из рис. 3, зависимость $\ln \gamma = f(1/T)$ полупроводника изображается прямыми линиями, тангенсы углов наклона которых равны $\Delta E_{np} / 2k$ и $\Delta E / 2k$. Поэтому для выполнения задания необходимо по экспериментальным данным построить график в координатах $\ln(1/R) - (1/T)$, провести через экспериментальные точки на этом графике усреднённую прямую, по тангенсу угла наклона определить ширину запрещённой зоны.

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.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Привести схему лабораторной установки. Объяснить методику проведения измерений и расчетов.
2. Какой материал имеет бóльшую величину удельного сопротивления: медь или константан и почему?
3. Что называют температурным коэффициентом удельного сопротивления? Чему он равен для большинства металлов?
4. Почему электропроводность металлов и сплавов падает с ростом температуры, а полупроводников растет?
5. Что такое ширина запрещенной зоны полупроводника и энергия активации примесей? В каких единицах они измеряются и на какие параметры полупроводников влияют?
6. Какие методы измерения ширины запрещенной зоны полупроводников Вы знаете?
7. Как можно использовать зависимость электропроводности металлов, сплавов и полупроводников 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Изучение модуль- 1

ного учебного комплекса МУК-ФОЭ1 для проведения лабораторных работ по курсу «Физические основы микро- и нанoeлектроники»

Лабораторная работа № 2. Исследование электропроводности металлов и полупроводников

32