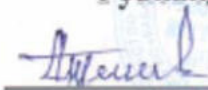


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный уни-
верситет им. Х.М. Бербекова»
(КБГУ)

Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП

 Р.Ш. Тешев
« 12 » февраля 2025 г.

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Б1.О.15 «РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ»

Специальность

11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы

Специализация

Радиоэлектронные системы передачи информации

Квалификация (степень) выпускника

Инженер

Форма обучения

Очная

Нальчик 2025

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Таблица 1

Код и формулировка компетенции	Индикаторы достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУН)
<p>ОПК-4. Способен проводить экспериментальные исследования и владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных данных.</p>	<p>ОПК-4.1. Способен применять современные методы, средства и оборудование для проведения экспериментальных исследований.</p> <p>ОПК-4.2. Способен анализировать и обобщать данные, получаемые в результате экспериментов.</p> <p>ОПК-4.3. Способен объективно оценивать полученные результаты экспериментальных исследований и погрешности результатов измерений.</p>	<p>Знать основные методы и средства проведения экспериментальных исследований, системы стандартизации и сертификации.</p> <p>Уметь выбирать способы и средства измерений и проводить экспериментальные исследования.</p> <p>Владеть способами обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.</p>

2. Шкала оценивания планируемых результатов обучения

2.1 Текущий контроль

Оценка результатов текущей успеваемости в рамках контрольных точек осуществляется посредством 70-балльной системы, при этом за добросовестное посещение занятий обучающийся может набрать до 10 баллов, за качественное прохождение оценочных мероприятий - до 60 баллов.

Таблица 2

Карта распределения рейтинговых баллов в рамках текущего контроля в 5 семестре

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
Лабораторные работы					
1	Лабораторная работа №1 «Определение типа проводимости полупроводниковых материалов».	Письменная, устный опрос	Студент должен получить допуск к выполнению работы, выполнить экспериментальную часть, провести статистическую обработку экспериментальных данных, сделать выводы по результатам измерений, оформить в виде отчетного файла результаты измерений и их обработку, включая выводы по работе, защитить результаты измерений.	6	6 – все задания работы выполнены верно, работа к защите представлена в полном объеме, выводы по работе обоснованы, при защите демонстрирует уверенное владение знаниями теоретических и экспериментальных основ метода измерения. 5- все задания работы выполнены верно, работа к защите представлена в полном объеме, выводы по работе обоснованы, при защите имеет место неуверенное владение знаниями теоретических и экспериментальных основ метода измерения. 4 - все задания работы выполнены, работа к защите представлена в полном объеме, но с небольшими не
2	Лабораторная работа №2 «Измерение электропроводности плёночных полупроводниковых структур».	Письменная, устный опрос		6	
3	Лабораторная работа №3 «Измерение времени жизни неосновных носителей заряда».	Письменная, устный опрос		6	
4	Лабораторная работа №4 «Определение концентрации носителей заряда по измерениям ЭДС-Холла».	Письменная, устный опрос		6	
5	Лабораторная работа №5 «Исследование свойств магнитомягких	письменная		6	

	материалов».			<p>доработками, в части обработки экспериментальных данных и их представлении, выводы по работе не полные, при защите демонстрирует неуверенное владение знаниями теоретических и экспериментальных основ метода измерения.</p> <p>3 - все задания выполнены верно, проведена неполная статистическая обработка экспериментальных и нет графического представления, выводы по работе имеют частично ошибки; неуверенно владеет знаниями теоретических основ метода измерения.</p> <p>2 – получен допуск к работе, все задания выполнены частично, выводы по работе некорректны, нет графического представления материалов, слабое владение материалом работы.</p> <p>1 – получен допуск к работе, но работа не выполнена.</p> <p>0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно.</p>
Контрольные работы				

	Контрольная работа №1	Письменная	Студент в письменном виде представляет решение задач по разделам, выведенным на самостоятельную подготовку	5	<p>5– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична;</p> <p>4 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки;</p> <p>3- ответы недостаточно полные;</p> <p>2 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов;</p> <p>1-ответы не на все вопросы, частичные.</p> <p>0 – ответы отсутствуют или полностью неверные</p>
	Контрольная работа №2	Письменная	Студент в письменном виде представляет решение задач по разделам, выведенным на самостоятельную подготовку	5	<p>5– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, задачи решены правильно;</p> <p>4 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки в решении задач;</p> <p>3- ответы недостаточно полные, но содержат незначительные ошибки в решении задач;</p> <p>2 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют</p>

					<p>наводящих вопросов, ошибки в решении задач;</p> <p>1-ответы не на все вопросы, частичные, задачи не решены.</p> <p>0 – ответы отсутствуют или полностью неверные, задачи не решены</p>
Тестирование					
11	Тесты по 1 контрольной точке	Дистанционное тестирование	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	5	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
12	Тесты по 2 контрольной точке	Дистанционное тестирование	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	5	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
Коллоквиумы					
14	Коллоквиум по 1 контрольной точке	Устный опрос	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума, по результатам работы устный опрос	5	<p>5– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична;</p> <p>4 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки;</p> <p>3- ответы недостаточно полные;</p> <p>2 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов;</p> <p>1-ответы не на все вопросы, частичные.</p> <p>0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.</p>
	Коллоквиум по 2 контрольной точке	Устный опрос	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума, по результатам работы	5	5– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание

			устный опрос		<p>темы, аргументация логична;</p> <p>4 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки;</p> <p>3- ответы недостаточно полные;</p> <p>2 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов;</p> <p>1-ответы не на все вопросы, частичные.</p> <p>0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.</p>
	Итого:			60	

Карта распределения баллов в рамках промежуточной аттестации

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Экзаменационный билет	Устный опрос	Билет содержит 2 теоретических вопроса. На теоретические вопросы студент должен ответить устно.	Теоретические вопросы – 30 баллов.	<p>Критерии оценивания теоретических вопросов:</p> <p>25 до 30 баллов: Глубокий уровень владения материалом, точное знание ключевых концепций, способность анализировать и интерпретировать факты, грамотно строить высказывания, привести примеры, свободно оперировать терминологией.</p> <p>От 19 до 24</p>

					<p>баллов: Базовое владение предметом, умение последовательно раскрыть основную мысль вопроса, грамотное применение терминов, наличие существенных элементов анализа и обобщений, но недостаточное развертывание или отдельные неточности. От 13 до 18</p> <p>баллов: Частичное освоение материала, попытка объяснить основной смысл вопроса, использование некоторых базовых терминов, но отсутствие глубокого понимания сложных моментов, логические недостатки изложения, отсутствие выводов. От 7 до 12</p> <p>баллов: Ошибочные представления, слабо выраженное владение основными понятиями, значительные затруднения в интерпретации вопросов, существенные фактологические ошибки, отсутствие обоснованных выводов и примеров. От 0 до 6</p> <p>баллов: Полное непонимание темы, неспособность</p>
--	--	--	--	--	--

					сформулировать адекватный ответ, грубые ошибки, несоответствие требованиям задания.
--	--	--	--	--	---

3. Оценочные материалы для текущего и промежуточного контроля успеваемости

3.1. Оценочные материалы для текущего контроля

3.1.1 Лабораторный практикум

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

I. Цели работы

1. Ознакомиться с эффектом Зеебека.
2. Получить практические навыки в определении типа проводимости полупроводников методом термозонда.
3. Определить в заданном температурном интервале коэффициенты термо-ЭДС некоторых полупроводниковых материалов.

II. Теоретические основы метода

В основе метода измерения типа проводимости полупроводниковых материалов лежит эффект Зеебека, суть которого заключается в следующем. Если в однородном образце проводника (полупроводника) создать градиент температуры то в последнем в направлении температурного градиента возникнет разность потенциалов, обусловленная направленным потоком носителей заряда с области более высокой температуры в холодную зону. Разность потенциалов, возникающая в образце, называется термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС). Величина термо-ЭДС E_T при заданной температуре T определяется природой материала и величиной температурного градиента. Удельные термоэлектрические свойства материалов характеризуются коэффициентом α :

$$\alpha = (\partial E_T / T)_T \quad (1.1)$$

Для невырожденных полупроводников удельную термо-ЭДС можно представить в виде [2]:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left\{ \frac{\left(2 + \ln \left(\frac{N_c}{n} \right) \right) n \mu_n - \left(2 + \ln \left(\frac{N_v}{p} \right) \right) p \mu_p}{n \mu_n + p \mu_p} \right\} \quad (1.2)$$

где N_c, N_v - эффективная плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне; n, μ_n и p, μ_p - концентрация и подвижность соответственно электронов и дырок, k - постоянная Больцмана, e - заряд электрона. Из (1.2) видно, что полярность и величина термо-ЭДС определяется типом основных носителей, следовательно, по знаку термо-ЭДС можно определить тип примесной проводимости исследуемого образца.

Для собственного полупроводника знак термо-ЭДС определяется шириной запрещённой зоны W_g и отношением подвижностей электронов и дырок:

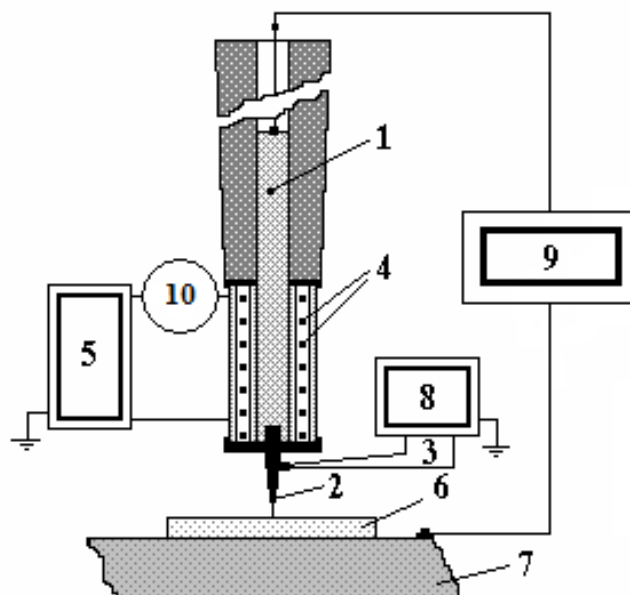
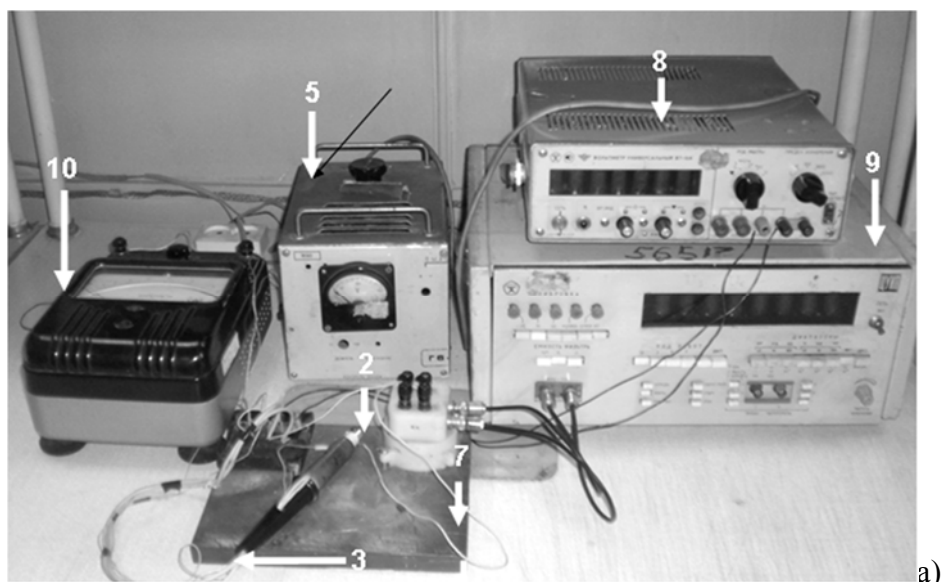
$$\alpha = -\frac{k}{e} \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \left(2 + \frac{W_g}{2kT} \right), \text{ где } b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (1.3)$$

Выражения (1.2) и (1.3) не учитывают возрастание термо-ЭДС за счет эффекта “фононного увлечения”, который экспериментально наблюдается в области низких температур. Рост термо-ЭДС при низких температурах, обусловлен тем, что фононы в направлении установившегося температурного градиента в образце увлекают носители заряда, так как передача импульса от фонона к фонону носит преимущественно направленный характер. При высоких температурах процесс “фононного увлечения” блокируется восстановлением изотропного распределения фононов.

III. Описание лабораторного стенда и методика измерений

Общий вид и схема лабораторного стенда для определения типа проводимости показана на рис. 1.1. Термозонд состоит из медного стержня 1 диаметром 6 мм в торце, которого впрессована вольфрамовая игла 2. Нагрев термозонда осуществляется резистивной микрорпечью 4, состоящей из полого кварцевого цилиндра, на который намотана нихромовая спираль. Питание микрорпечи осуществляется автотрансформатором 5 типа ЛА-9. Уровень нагрева зонда задается величиной тока пропускаемого через микрорпечь. Ток микрорпечи контролируется амперметром 10. Температура термозонда измеряется с помощью хромель-алюмелевой термопары 3, спай которой размещен на поверхности медного стержня. Термо-ЭДС термопары измеряется цифровым милливольтметром 8.

В процессе измерения образец 6 помещается на массивный медный блок 7, находящийся при комнатной температуре T_k . Затем, после установления температуры термозонд вертикально опускается на образец. После контакта, величина и знак термо-ЭДС E_T определяются по показаниям цифрового универсального измерительного прибора 9(ЦУИП).



б)

Рис. 1.1. Общий вид(а) и схема(б) лабораторного стенда для измерения термо-ЭДС: 1- медный стержень; 2- вольфрамовая игла; 3- термопара; 4- печь термозонда; 5- автотрансформатор; 6- образец; 7- медный блок; 8- мультиметр; 9- ЦУИП; 10 - амперметр.

IV. Порядок проведения работы и указания по технике безопасности

1. Проверить заземление измерительных приборов.
2. Проверить схему подключения элементов лабораторного стенда.
3. Получить у лаборанта образцы с неизвестным типом проводимости.
4. Включить автотрансформатор и установить ток печи термо-зонда не более 1А.
5. Для улучшения количества теплового и электрического контакта зачистить контактируемые поверхности медного блока, термозонда и образца.

6. Провести разбраковку образцов по типу проводимости и измерение термо-ЭДС.

7. Снять показания термо-ЭДС термопары U_T^i при токах нагрузки печи термозонда зонда $J_i = 0.5; 0.4; 0.3; 0.2A$. По калибровочным кривым термо-ЭДС хромель-алюмелевых термопар определить температуру термозонда $T_z^{(i)}$ с поправкой на комнатную температуру T_k . Данные по зависимости термо-ЭДС термопар от температуры взять из [3].

8. Провести измерения термо-ЭДС $E_T^{(i)}$ образца на каждой температуре термозонда $T_z^{(i)}$ устанавливаемой при токовых нагрузках печи зонда $J_i = 0.5; 0.4; 0.3; 0.2A$. Полученные результаты по пунктам 6, 7, 8 свести в таблицу 1.1 (рабочие записи результатов измерений в форме табл. 1.1), которую по завершению работы подписать у преподавателя.

Таблица 1.1

№ образца	Тип проводимости	J_i , А	U_T^i , мВ	$T_z^{(i)}$, К	$E_T^{(i)}$, мкВ	$\alpha_T^{(i)}$, мкВ/К	$\bar{\alpha}_T$, мкВ/К
N							

V. Методика обработка и представления результатов измерений

1. Рассчитать значения коэффициента термо-ЭДС $\alpha_T^{(i)}$ для каждого образца при всех температурах зонда:

$$\alpha_T^{(i)} = E_T^{(i)} / \Delta T_i, \text{ где } \Delta T_i = T_z^{(i)} - T_k.$$

2. Используя редактор Microsoft Exell, рассчитать среднее значение и погрешность определения коэффициента термо-ЭДС для каждого образца с использованием t -критерия Стьюдента для 95% доверительного интервала. Окончательное выражение для коэффициента термо-ЭДС представить в виде:

$$\alpha_T = \bar{\alpha}_T \pm t \cdot \sigma_\alpha,$$

где $\bar{\alpha}_T$ - среднее значение коэффициента термо-ЭДС ; σ_α -среднеквадратичное отклонение; t - критерий Стьюдента для 95% доверительного интервала.

VI. Требования к отчёту

Отчет по работе должен содержать:

1. Схему измерительного лабораторного стенда и порядок проведения измерений.
2. Оформленную для сдачи работы таблицу 1.1 и результаты обработки экспериментальных данных.

VII. Примерные контрольные вопросы и задания для допуска и сдачи работы

1. В чем заключаются цели выполнения данной работы
2. В чем физическая суть эффекта Зеебека?
3. Нарисовать схему лабораторного стенда и пояснить назначение элементов схемы. Определить назначение элементов и приборов входящих в состав лабораторного стенда.
4. Требования к электрическому и тепловому контакту термозонда с образцом.
4. Какими параметрами определяется знак термо-ЭДС в полупроводниках?
5. Как соотносятся абсолютные величины коэффициентов термо-ЭДС для собственного, примерного и вырожденного кремния? Ответ обосновать.
6. Что представляет собой эффект «фононного увлечения»?
7. Дать анализ типовой зависимости коэффициента термо-ЭДС от температуры для примерного полупроводника.

IVIII. Литература

1. Методы исследования термоэлектрических свойств полупроводников / Под ред. А.Р.Регеля - М.: Атомиздат, 1969. С. 36-56.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников - М.: Энергия, 1976. С. 195-200.
3. Практикум по химии и технологии полупроводников. Под ред. проф. Я.А. Угая - М.: Высшая школа, 1978. С. 183-185.

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛЁНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

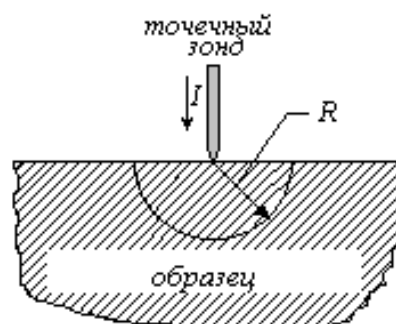
I. Цель работы

1. Ознакомиться с теоретическими основами четырех зондового метода измерения удельного сопротивления.

2. Приобрести практические навыки в измерении удельного сопротивления диффузионных, эпитаксиальных и ионно-легированных слоев на пластинах кремния применяемых в технологии производства дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем.

II. Физические основы метода

Четырех зондовый метод измерения удельного сопротивления основан на использовании особенностей растекания тока в точечном контакте. Решение уравнения Лапласа применительно к задаче о распределении потенциала в полубесконечном образце вблизи



точечного зонда (см. рис.4.1.) позволяет

Рис.4.1. К модели точечного зонда на полубесконечной плоскости установить аналитическую связь между удельным сопротивлением образца ρ , величиной тока I протекающего через зонд и потенциалом $U(R)$ наводимым токовым зондом на полусфере радиусом R в объеме образца. Связь выглядит следующим образом:

$$U(R) = I\rho / 2\pi R \quad (4.1)$$

Выражение (4.1) справедливо при условии, что образец является однородным. Применим выражение (4.1) для получения базовых соотношений необходимых для определения удельного сопротивления в рамках четырех зондового метода. Пусть на плоской поверхности образца вдоль прямой линии размещаются четыре точечных зонда в соответствии со схемой измерения (см. рис.4.2.).

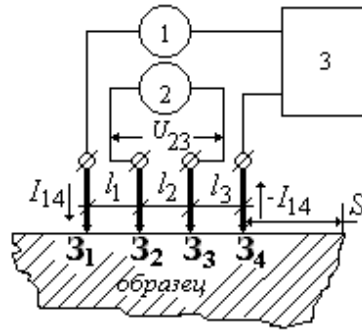


Рис.4.2. Схема метода измерения удельного сопротивления: 1 - измеритель тока; 2 - вольтметр; 3 - источник питания; Zi– i-й точечный зонд.

Через токовые зонды Z_1 и Z_4 протекает ток величиной I_{14} . В соответствии с принципом суперпозиции, электрический потенциал в любой точке образца равен сумме потенциалов, наводимых в этой точке токовыми зондами. Учитывая, что потенциал имеет положительный знак для тока втекающего в образец (зонд Z_1) и отрицательный для тока вытекающего из образца (зонд Z_4) определим потенциалы измерительных зондов:

$$U_2 = \frac{\rho \cdot I_{14}}{2\pi} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2 + l_3} \right) \quad (4.2)$$

$$U_3 = \frac{\rho \cdot I_{14}}{2\pi} \left(\frac{1}{l_1 + l_2} - \frac{1}{l_3} \right) \quad (4.3)$$

Соответственно разность потенциалов между зондами 2 и 3 будет равна

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{\rho \cdot I_{14}}{2\pi} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2 + l_3} - \frac{1}{l_1 + l_2} + \frac{1}{l_3} \right) \quad (4.5)$$

Если принять расстояние между зондами равными, т.е. $l_1 = l_2 = l_3 = l$, то

$$U_{23} = \frac{\rho \cdot I_{14}}{2\pi l} \quad (4.6)$$

Откуда

$$\rho = 2\pi l \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (4.7)$$

Выражение (4.7) позволяет по заданным значениям I_{14} , l и U_{23} рассчитать удельное сопротивление образца. Возможны другие комбинации включения токовых и потенциал-

ных зондов, но для каждого случая требуется вывод соответствующего выражения для оценки ρ .

В обобщенном виде выражение (4.7) может быть записано как:

$$\rho = A \pi d \frac{U_{23}}{I_{14}}, \quad (4.8)$$

где A - числовой коэффициент, определяемый выбранной комбинацией зондов. Для различных комбинаций зондов значение коэффициента A приведены в таблице 4.1. Предпочтительней использовать комбинацию включения зондов 1 и 4, поскольку они обеспечивают максимальную регистрируемую разность потенциалов при прочих равных условиях проведения измерений.

Таблица 4.1

№ п/п	Зонды	Ток	Зонды	Напряжение	A
1	1-4	I_{14}	2-3	U_{23}	2π
2	1-2	I_{12}	3-4	U_{34}	6π
3	1-3	I_{13}	2-4	U_{24}	3π
4	2-3	I_{23}	1-4	U_{14}	2π
5	2-4	I_{24}	1-3	U_{13}	3π
6	3-4	I_{34}	1-2	U_{12}	6π

III. Методика измерений

Четырех зондовый метод применяют для измерения удельного сопротивления тонких слоев на подложках, отличающихся от слоя величиной удельного сопротивления или типом носителей заряда, а также образцов разнообразной геометрической формы, имеющих одну плоскую поверхность, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов. Требования к токовым и потенциальным зондам аналогичны требованиям, предъявляемым к зондам в двухзондовом методе (см. Лабораторная работа № 2). Величина рабочего тока выбирается такой, чтобы в процессе измерения не происходило разогрева образца. Рекомендуемые значения задаваемого тока через для образцов с различным удельным сопротивлением приведены в таблице 4.2. При измерениях уровень выбранного тока не должен приводит к изменению проводимости образца за счет процессов инжекции носителей заряда и разогреву образца.

Существенное влияние на результаты определения удельного сопротивления оказывают краевые эффекты.

Таблица 2

Удельное сопротивление ρ , Ом·см	Рабочий ток I , А	Измеряемое напряжение U , В	Входное сопротивление $\geq R$, Ом
10^{-3}	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^3$
10^{-2}	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^4$
10^{-1}	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^5$
1,0	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^6$
10^1	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^7$
10^6	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^8$
10^3	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^8$

Это связано с нарушениями однородности электрического поля в образце, когда токовые зонды располагаются вблизи края образца. Для коррекции влияния этих эффектов на результаты измерений в выражение (4.8) вводится поправочная функция $f(S/l)$, где S - расстояние от края образца до ближайшего зонда:

$$\rho = A\pi l \frac{U_{23}}{I_{14}} f(S/l) \quad (4.9)$$

При измерении удельного сопротивления тонких пластин толщиной h , удовлетворяющих условию $h/l=(0 \div 0,4)$ расчетное значение ρ не зависит от расстояния между зондами и определяется выражением:

$$\rho = \frac{\pi h}{\ln 2} \frac{U_{23}}{I_{14}} = 4,532 h \frac{U_{23}}{I_{14}} \quad (4.10)$$

Последнее соотношение используется при измерениях удельного сопротивления диффузионных и ионно-легированных слоев. В том случае, когда удельная проводимость подложки больше удельной проводимости сформированного на ней слоя возможности четырех зондового метода ограничены. В этом случае, электрический ток практически полностью течет по подложке, а сопротивление слоя не влияет на результат измерений.

На рис. 4.3 и 4.4 приведены схема и общий вид лабораторного стенда. С помощью регулируемого источника напряжения 1(ЛИПС II-30) и потенциометра 2 задается ток I_{14} через 1 и 4 зонды размещенные на поверхности образца 3. Задаваемое значение тока кон-

тролируется мультиметром 4. Измерение напряжения U_{23} а зондах 2 и 3 регистрируется электронным вольтметром 5 (В7-35) с входным сопротивлением порядка 10^8 Ом, что позволяет устранить влияние контактного сопротивления потенциальных зондов на результаты измерений. Измерение U_{23} проводится при двух направлениях тока. Изменение направления тока осуществляется переключателем 6.

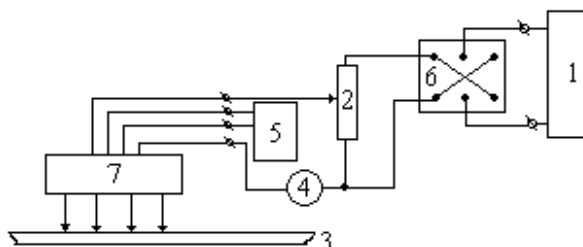


Рис. 4.3. Схема лабораторного стенда измерения удельного сопротивления четырех зондовым методом: 1-регулируемый источник стабилизированного напряжения ЛИПС II-30; 2- потенциометр; 3-пластина; 4-измеритель тока; 5- электронный вольтметр; 6-переключатель направления тока; 7- измерительная головка ДЕМ.3.650.000.

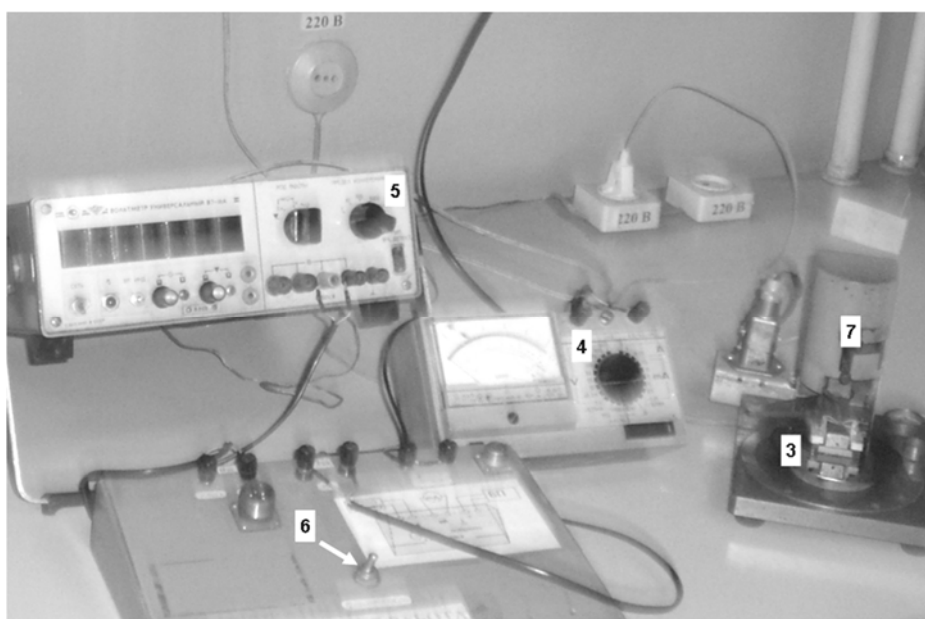


Рис. 4.4. Вид лабораторного стенда измерения удельного сопротивления четырех зондовым методом: 3-пластина; 4-измеритель тока; 5- электронный вольтметр; 6-переключатель направления тока; 7- измерительная головка ДЕМ.3.650.000.

В качестве зондовой системы используется четырех-зондовая головка 7(ДЕМ.3.650.000). Зонды выполнены из вольфрама с углом заточки 120° . Четырех-зондовая головка закреплена на манипуляторе, с помощью которого зонды устанавливаются на поверхность образца. Усилие прижима зондов к поверхности должно быть не более 1 Н , а расстояние между зондами равно $1,3 \pm 0,01\text{ мм}$.

IV. Порядок проведения работы

1. Провести коммутацию измерительных приборов в соответствии со схемой измерительного стенда.
2. Проверить надежность заземления измерительных приборов.
3. Установить образец кремниевой пластины на предметном столике.
4. С помощью манипулятора и ложного зонда выбрать необходимую точку на поверхности пластины и опустить измерительную зондовую головку.
6. Совместно с преподавателем определить диапазон рабочих токов пропускаемых через образец и в соответствии с рекомендациями приведенными в таблице 4.2. Выбрать 5 значений величин тока I_{14}^j ($j=1..5$), на которых будут проводиться измерения.
7. Провести измерения U_{23} в соответствии с последовательностью точек измерения приведенной на рис. 4.4.

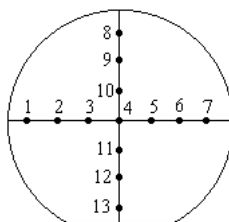


Рис.4.4. Схема последовательности точек измерения удельного сопротивления на полупроводниковой пластине

В каждой i -й точке проводятся измерения U_{23}^+ и U_{23}^- для 5-ти значений выбранных величин тока, соответственно в прямом($+I_{14}^j$)и обратном направлениях тока($-I_{14}^j$). Результаты заносятся в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

№ точки,	$I_{14}^{(j)}$	U_{23}^+ , мВ	U_{23}^- , мВ	\bar{U}_{23}^j мВ	ρ_j^i , Ом·см	Среднее значение уд. сопротивления в i -ой точке, Ом·см
i	$I_{14}^{(1)}$					$\bar{\rho}_i$
	$I_{14}^{(2)}$					
	$I_{14}^{(3)}$					
	$I_{14}^{(4)}$					

	$I_{14}^{(5)}$					
--	----------------	--	--	--	--	--

V. Методика обработка и представления результатов измерений

1. По экспериментальным значениям заданных и измеренных величин (см. Табл. 3)

рассчитать $\bar{U}_{23}^j = \frac{|U_{23}^+| + |U_{23}^-|}{2}$ - среднее значение разности потенциала на зондах 2 и 3 при про-

текании j -го значения тока в прямом и обратном направлении; $\rho_j^N = 2\pi \cdot l \cdot \frac{\bar{U}_{23}^j}{I_{14}^j}$ - значение

удельного сопротивления на j -м токе в i -й точке; $\bar{\rho}_i = \frac{\sum_{j=1}^5 \rho_j^i}{5}$ - удельное сопротивление пластины в i -ой точке. Результаты расчета занести в таблицу 4.3.

2. Используя редактор Microsoft Exel, рассчитать среднее значение и погрешность определения удельного с использованием:

$$\rho = \bar{\rho} + t \cdot \sigma_{\rho},$$

где $\bar{\rho}$ - среднее значение удельного сопротивления; σ_{ρ} - среднеквадратичное отклонение; t - критерий Стьюдента для 95% доверительного интервала.

3. По значению $\bar{\rho}$ определить концентрацию носителей заряда, используя кривые Ирвинга.

VI. Требование к отчету

Отчет должен содержать:

1. Краткое описание методики измерений.
2. Оформленную для сдачи работы таблицу 4.3 и результаты обработки данных.
3. Заключение, касающиеся однородности полупроводниковой пластины по данным измерения удельного сопротивления.

VII. Примерные контрольные вопросы и задания для допуска и сдачи работы

1. Какие требования предъявляются к геометрической форме образца в методе четырех зондов?
2. Выведите выражение для оценки удельного сопротивления, для случая, когда зонды 2 и 3 являются токовыми, а 1 и 4 потенциальными.
3. Почему включение зондов 1 и 4, в качестве токовых, предпочтительней в методе четырех зондов? Ответ обосновать.

4. Какими причинами обусловлены ограничения на величину тока в методе четырех зондов?

5. Какими причинами обусловлены ограничения на толщину пленок при измерении их удельного сопротивления методом четырех зондов?

VIII. Литература

1. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов - М.: Наука, 1987. С.7-49.

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

I. Цель работы

1. Ознакомление с фотоэлектрическими свойствами полупроводника.
2. Экспериментальное определение времени жизни неравновесных носителей в полупроводниковых образцах методом релаксации фотопроводимости.

II. Теоретические основы метода

В основе метода определения времени жизни носителей заряда лежит явление рекомбинации неравновесных носителей заряда (ННЗ), к которым относятся электроны и дырки проводимости не находящиеся в термодинамическом равновесии при данных условиях как по концентрационному, так и по энергетическому распределению.

Одной из причин вызывающих генерацию ННЗ является процесс взаимодействия светового излучения с полупроводником, в результате которого происходит поглощение световых квантов.

Известны несколько механизмов поглощения (см. рис. 5.1):

1. Собственное поглощение (1) - возбуждение электронов в валентной зоне с последующим переходом их в зону проводимости.
2. Экситонное поглощение (2) - образование особых возбужденных состояний электронов валентной зоны, которые представляют собой систему из взаимосвязанных собственными электростатическими полями электрона на экситонном уровне $E_{\text{э}}$ и оставленной им дыркой.
3. Поглощение носителями заряда (3, 3') - возбуждение носителей заряда с последующим переходом электронов и дырок с одного энергетического уровня на другой внутри зоны проводимости и валентной зоны.

4. Примесное поглощение ($4, 4'$) - ионизация примесных атомов, когда энергия фотона тратится на переход электронов с донорных уровней W_d в зону проводимости, либо на переход электронов из валентной зоны на акцепторные уровни W_a .

5. Поглощение решеткой - энергия поглощенного фотона идет на изменение колебательной энергии атомов.

Генерация ННЗ происходит при действии 1 и 4 механизмов поглощения.

При длительном воздействии на полупроводник светового излучения постоянной плотности процесс генерации ННЗ уравнивается обратным процессом (рекомбинацией).

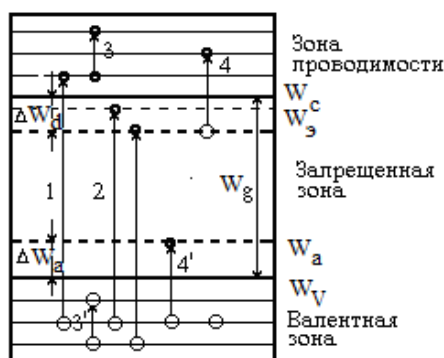


Рис. 5.1. Возможные переходы носителей заряда при поглощении квантов света полупроводником W_g , ΔW_d и ΔW_a -соответственно энергии ионизации собственных, донорных и акцепторных атомов.

В результате в полупроводнике устанавливается некоторая стационарная избыточная по отношению к равновесной концентрация электронов и дырок. По прекращению светового воздействия рекомбинационные процессы (релаксация) приводят к уменьшению концентрации ННЗ, вплоть до установления термодинамического равновесия.

Различают три основных процесса рекомбинации:

1. Прямая рекомбинация - одноступенчатый переход электрона с зоны проводимости в валентную зону. Энергия выделяемая в этом процессе затрачивается либо на увеличение колебательной энергии атомов (безизлучательная рекомбинация), либо на излучение фотона (излучательная рекомбинация).

2. Рекомбинация через центры захвата - переход электрона из зоны проводимости в валентную зону через локализованные состояния в запрещенной зоне.

3. Поверхностная рекомбинация - аналогична процессу 2, но переход осуществляется через энергетические уровни, появление которых обусловлено особенностями структурного и химического состояния поверхности образца.

В процессе воздействия светового потока на полупроводник полная концентрация электронов и дырок определяется формулами:

$$n=n_0+\Delta n, (5.1)$$

$$p=p_0+\Delta p, (5.2)$$

где n_0, p_0 - концентрация равновесных носителей заряда; $\Delta n, \Delta p$ - концентрация равновесных носителей заряда.

Возникновение ННЗ приводит к изменению электропроводности полупроводника. Значение электропроводности можно оценить по формуле:

$$\sigma=\sigma_T+\Delta\sigma=e(n_0\cdot\mu_n+p_0\cdot\mu_p)+e(\Delta n\cdot\mu_n+\Delta p\cdot\mu_p) (5.3)$$

где μ_n и μ_p подвижность носителей заряда; σ_T и $\Delta\sigma$ - темновая (равновесная) и световая (неравновесная) проводимость; e - заряд носителя.

Прекращение светового воздействия приводит к уменьшению концентрации ННЗ и соответственно к спаду фотопроводимости. Изменение концентрации ННЗ в единицу времени есть разность между скоростями генерации g и рекомбинации r .

Для электронов

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = g_n - r_n (5.4)$$

для дырок

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = g_p - r_p (5.5)$$

Если прекратить освещение образца, то генерация прекратится и уравнения (3) и (4) можно записать в виде:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -r_n (5.6)$$

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = -r_p (5.7)$$

В случае линейной рекомбинации, когда концентрация $\Delta n \ll p$ и $\Delta p \ll n$ можно представить в виде:

$$r_n = \Delta n / \tau_n, (5.8)$$

$$r_p = \Delta p / \tau_p, (5.9)$$

где $\tau_n(\tau_p)$ - время, в течении которого возбужденный электрон находится в зоне проводимости (возбужденная дырка в валентной зоне).

Подставив (7) и (8) в (5) и (6) и решив соответствующие уравнения относительно текущей концентрации ННЗ получим

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-t/\tau_n), (5.10)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(-t/\tau_p), (5.11)$$

где Δn_0 и Δp_0 - концентрация неравновесных электронов и дырок в момент $t=0$. Из (5.10), (5.11) видно, что концентрация избыточных носителей уменьшается по экспоненциальному закону с постоянной времени τ_n и τ_p . Если учесть условие электронейтральности $\Delta n = \Delta p$, то величины τ_n и τ_p можно определить как среднее время жизни τ электронно-дырочных пар.

III. Описание лабораторного стенда и методика измерений

Рассмотрим возможность экспериментального определения времени жизни ННЗ по спаду фотопроводимости. В качестве примера возьмем примесный полупроводник р-типа ($p > n$), представляющий собой образец длиной l и площадью поперечного сечения S . Образец включен в электрическую цепь, показанную на рис. 5.2 с источником напряжением питания $U_{п}$. В этом случае, падение напряжения U_n на нагрузке R_n , после прекращения локального светового воздействия на образец можно оценить по формуле:

$$U_n = R_n \cdot I = \frac{U_{п} R_n}{R_{обп.} + R_n} \quad (5.12)$$

при $R_{обп.} \gg R_n$

$$U_n = U_{п} \cdot R_n / R_{обп.} \quad (5.13)$$

С другой стороны

$$R_{обп.} = \frac{l}{(\sigma_T + \Delta\sigma) \cdot S} = \frac{l}{\sigma_T \cdot S + e\mu_n \cdot \Delta n_0 \cdot S \cdot \exp(-t / \tau_n)} \quad (5.14)$$

В (5.14) введем переобозначения $A = \sigma_T \cdot S / l$ и $B = e \cdot \mu_n \cdot \Delta n_0 \cdot S / l$ и подставим в (5.13) получим

$$U_n = A' + B' \exp(-t / \tau_n), \quad (5.15)$$

где $A' = U_{п} \cdot R_n \cdot A$ и $B' = U_{п} \cdot R_n \cdot B$.

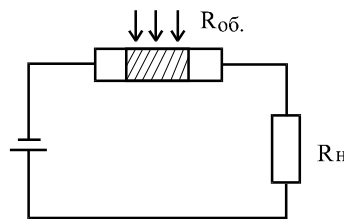


Рис.5.2. Условная схема включения образца.

Так как A' и B' постоянные, то переменная составляющая ΔU_n в процессе спада фотопроводимости будет определяться экспоненциальным членом в (5.15)

$$\Delta U_n = B' \exp(-t / \tau_n). \quad (5.16)$$

Из выражения (5.16) видно, что для экспериментального определения времени жизни ННЗ, нужно знать время, в течении которого величина ΔU_n , вследствие спада фотопроводимости уменьшается в e -раз по отношению к ΔU_n^0 в момент времени $t=0$.

Схема лабораторного стенда измерения релаксации фотопроводимости представлена на рис. 5.3.

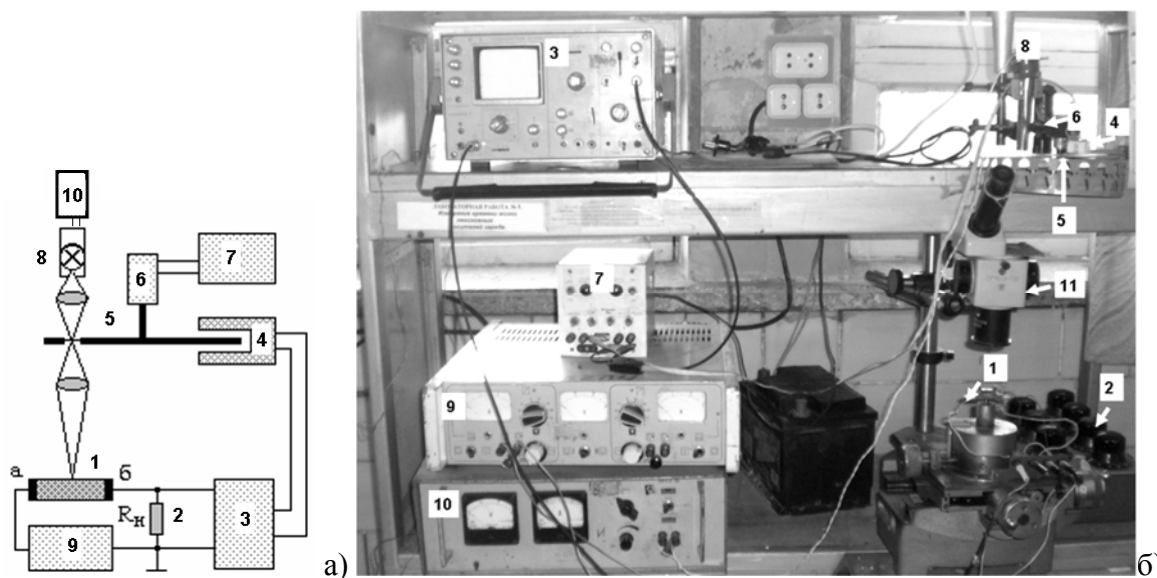


Рис. 5.3. Схема(а) и общий вид(б) лабораторного стенда 1 -образец; 2 - магазин сопротивлений (МСП-63); 3 - осциллограф; 4 - электронный тахометр; 5 - диск; 6 - электродвигатель; 7 - блок питания электродвигателя; 8 - галогенная лампа; 9 - блок питания образца; 10 - блок питания галогенной лампы; 11 – микроскоп МБС-10.

Образец 1 устанавливается на предметный столик и фиксируется прижимными токовыми контактами а и б. Ток через образец задается источником постоянного напряжения 9. Последовательно с образцом подключается сопротивление нагрузки, в качестве которого используется магазин сопротивлений 2. Падение напряжения U_n подается на дифференциальный вход запоминающего осциллографа 3. Развертка сигнала на осциллографе синхронизирована частотой следования импульсов света воздействующих на образец. Длительность светового импульса и темновой промежутков регулируется скоростью вращения диска 5, имеющего на периферии щелевую диафрагму. Варьирование частотой вращения диска осуществляется изменением напряжения подаваемого на электродвигатель 6 с помощью источника питания 10, от которого питается и галогенная лампочка 8.

Для юстировки светового пучка на образец используется оптическая система 11 на базе микроскопа МБС-10.

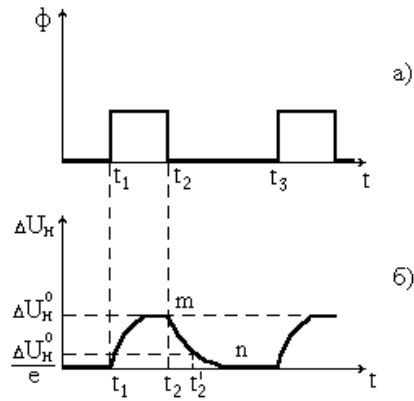


Рис. 4. Осциллограммы импульсов света(а) и изменения падения напряжения на нагрузочном сопротивлении(б): Φ - световой поток.

При измерениях длительность светового импульса t_2-t_1 (см. рис. 4,а) выбирается такой, чтобы за время достигалось стационарное значение фотопроводимости, а за время темнового промежутка t_3-t_2 она успевала спадать до нуля ($\Delta U_n=0$). На рис.5.4б приведена типичная осциллограмма напряжения на нагрузке. Участок импульса mn , характеризует спад фотопроводимости и описывается выражением (5.16). Зная время начала спада (t_2) и время (t_2'), за которое $\Delta U_n(t_2)$ уменьшается в e -раз $\Delta U_n(t_2')$ можно рассчитать среднее время жизни ННЗ:

$$\tau = t_2' - t_2 \quad (5.17)$$

IV. Порядок проведения работы и указания по технике безопасности

1. Ознакомиться с описанием измерительного стенда. Перед измерением проверить заземление приборов и устройств.
2. Установить образец на предметный столик и закрепить прижимные токовые контакты. Проверить надежность электрического контакта и провести коммутацию измерительных приборов и образца в соответствии со схемой.
3. Провести фокусировку светового пучка на поверхности образца и установить пятно диаметром не более 500 мкм посередине образца между токовыми контактами.
4. Включить электродвигатель и осциллограф в обычном режиме.
5. Магазином сопротивлений подобрать значение R_n , которое при данных условиях обеспечивает максимальной амплитуды сигнал фотопроводимости.
6. Изменением частоты вращения диска и синхронизацией добиться осциллограммы вида (см. рис.5.4 б). При необходимости провести корректировку масштабных коэффициентов временной развертки и развертки сигнала.
7. Провести измерение времени жизни ННЗ в локальных точках на образце, согласно приведенной ниже схеме.



При шаге зондирования 0,5 мм провести измерения не менее чем в 11 точках. Смещение точек зондирования проводить путем смещения образца относительно луча.

8. Зарисовать на миллиметровой бумаге все осциллограммы с указанием коэффициентов временной развертки и развертки сигнала.

V. Методика обработка и представления результатов измерений

1. Из осциллограмм согласно методике описанной выше определить времена жизни неосновных носителей заряда τ_i для каждой точки зондирования.

2. Используя редактор Microsoft Excel, рассчитать среднее значение и погрешность определения времени жизни:

$$\tau = \bar{\tau} + t \cdot \sigma_{\tau},$$

где $\bar{\tau}$ - среднее значение времени жизни ; σ_{τ} - среднеквадратичное отклонение; t - критерий Стьюдента для 95% доверительного интервала.

VI. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Описание методики измерения.
2. Схему измерения.
3. Осциллограммы релаксации фотопроводимости.
4. Результаты расчета времени жизни ННЗ.

VII. Примерные контрольные вопросы и задания для допуска и сдачи работы

1. Какие носители заряда называются равновесными, а какие - неравновесными?
2. Какие механизмы генерации приводят к появлению свободных носителей заряда?
3. Что такое время жизни носителей заряда?
4. Дайте определение излучательной и безизлучательной рекомбинации.
5. Как экспериментально определяется время жизни носителей заряда?
6. Основные механизмы рекомбинации ННЗ.
7. Выведите выражение, описывающее спад фотопроводимости.

8. Как изменяется время жизни носителей заряда с увеличением концентрации примеси?

VIII.IX. Литература

1. Шалимова К. В., Физика полупроводников - М.: Энергия, 1971. С. 256-276.
2. Павлов Л. П., Методы измерения параметров полупроводниковых материалов - М.: Высшая школа, 1987. С. 81-92.
3. Лысов В. Ф., Практикум по физике полупроводников - М.: Просвещение, 1976. С. 57-71, 77-79.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЭДС-ХОЛЛА

I. Цель работы

1. Ознакомление с методами измерения ЭДС Холла.
2. Приобрести практических навыки экспериментального определения типа и концентрации носителей заряда в полупроводниковых материалах на основе данных измерений ЭДС Холла

II. Теоретические основы метода измерения ЭДС-Холла

ЭДС-Холла возникает в проводниковом или полупроводниковом образце при одновременном воздействии на него электрического и магнитного полей. Природа данного гальваномагнитного явления, известного как эффект Холла заключается в следующем. Если взять образец в форме параллелепипеда (см. рис. 6.1) через который протекает ток величиной I_x и поместить его во внешнее магнитное поле с индукцией B_z , то на боковых гранях образца перпендикулярных направлению y возникнет разность потенциалов U_H (ЭДС Холла).

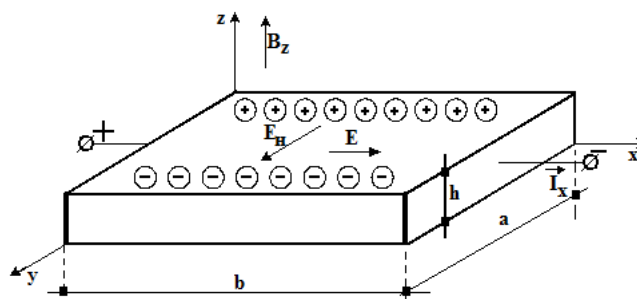


Рис.1. К схеме возникновения ЭДС-Холла

Причиной возникновения U_H является смещение носителей заряда под действием силы Лоренца, значение которой определяется соотношением

$$F_{л} = q \left[\vec{V} \cdot \vec{B} \right] = q \cdot V \cdot B \cdot \sin \varphi \quad (6.1)$$

где q , V -соответственно заряд и дрейфовая скорость носителей заряда; φ -угол между векторами дрейфовой скорости \vec{V} и индукции магнитного поля \vec{B} .

Дрейфовую скорость носителей заряда в электрическом поле E можно представить как:

$$V = \frac{q \cdot E}{m} \cdot \tau \quad (6.2)$$

где m , τ - соответственно масса и время сводного пробега носителя заряда.

Подставив (6.2) в (6.1) получим

$$F_{л} = \frac{q^2}{m \cdot \tau} \left[\vec{E} \cdot \vec{B} \right] \quad (6.3)$$

Из (6.3) нетрудно видеть, что направление смещения носителей зарядов не зависит от знака последних и определяется векторным произведением.

Динамическое равновесие в системе под действием магнитного поля устанавливается, когда $F_{л}$ уравновешивается силой электрического поля E_H (Холловское поле) создаваемого перераспределившимися зарядами. Это состояние отражается равенством

$$q \cdot V \cdot B_H = q \cdot E_H \quad (6.4)$$

При условии однородности поля E_H и плотности тока j в образце, заменим в (6.4) V и E_H через известные соотношения:

$$V = \frac{j}{e \cdot n} = \frac{I}{e \cdot n \cdot a \cdot h} \quad (6.5)$$

$$E_H = \frac{U_H}{a}$$

и получим расчетное выражение для ЭДС Холла

$$U_H = \frac{1}{q \cdot n} \cdot \frac{I \cdot B_z}{h} \quad (6.6)$$

где j - плотность тока через образец; n - концентрация носителей заряда; a , h - соответственно ширина и толщина образца. Выражение (5.6) справедливо для оценки ЭДС Холла в вырожденных полупроводниках и металлах.

В общем случае, U_H определяется как

$$U_H = \frac{A}{q \cdot n} \cdot \frac{I \cdot B_z}{h}, \quad (6.7)$$

где A - Холл-фактор, принимающий значения от 1 до 2 в зависимости от доминирующего механизма рассеяния носителей заряда, степени вырождения полупроводника и величины магнитного поля.

Отношение A/qn носит название коэффициента Холла. Для невырожденных примесных полупроводников коэффициент Холла определяется как

$$R_H = \begin{cases} -\frac{A_n}{e \cdot n_0} & (\text{n - тип}) \\ \frac{A_p}{e \cdot p_0} & (\text{p - тип}) \end{cases} \quad (6.8)$$

где p_0, n_0 - равновесные концентрации дырок и электронов в образце; A_n и A_p - значения Холл-факторов для примесных полупроводников.

Выражения (6.8) работают в условиях слабых магнитных полей, где соблюдаются соотношения:

$$\mu_n^2 \cdot B_Z \ll 1 \text{ либо } \mu_p^2 \cdot B_Z \ll 1 \quad (6.9)$$

где μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок.

В сильном магнитном поле ($\mu_n^2 \cdot B_Z \gg 1$; $\mu_p^2 \cdot B_Z \gg 1$) коэффициент Холла не зависит от механизма рассеяния носителей и от степени вырождения полупроводника, а определяется только концентрацией носителей заряда, при этом $A_{n(p)}=1$.

В случае невырожденных полупроводников, для которых может быть применена статистика Максвелла-Больцмана, значение Холл-фактора при различных механизмах рассеяния имеет следующие значения:

$A=1,18$ - рассеяние на акустических фотонах;

$A=1,93$ - рассеяние на ионизированных атомах примеси.

Для полупроводников с электронной и дырочной составляющей проводимости в условиях слабых магнитных полей коэффициент Холла определяется соотношением

$$R_H = \frac{A}{e} \cdot \frac{p_0 \cdot \mu_p^2 - n_0 \cdot \mu_n^2}{(p_0 \cdot \mu_p + n_0 \cdot \mu_n)^2}, \quad (6.10)$$

откуда для собственного полупроводника $n_0 = p_0 = n_i$ получим

$$R_H = \frac{A}{en_i} \cdot \frac{\mu_p - \mu_n}{(\mu_p + \mu_n)} \quad (6.11)$$

Нетрудно видеть, что знак коэффициента Холла в области собственной проводимости определяется соотношением величин подвижности электронов и дырок. В случае примесного полупроводника знак коэффициента Холла определяется типом носителей.

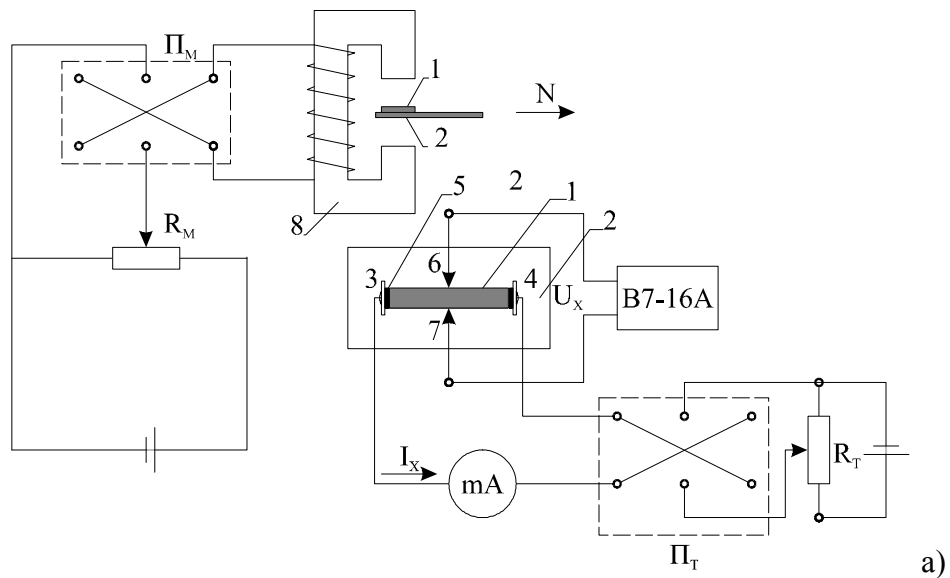
III. Описание лабораторного стенда и методика измерений

Измерение ЭДС Холла проводятся на образцах различной геометрической формы с использованием постоянного, переменного тока и магнитного поля при их возможных комбинациях. Различные варианты измерения ЭДС Холла и постоянной Холла изложены в работе [1].

В данной работе измерения U_H проводятся на образцах прямоугольной формы в условиях постоянного тока и магнитного поля. Постоянная Холла рассчитывается по формуле:

$$R_H = \frac{h \cdot U_H}{I \cdot B_z} \quad (6.12)$$

Нетрудно видеть, что для оценки R_H необходимо измерить Холловскую разность потенциалов, протекающий через образец ток, магнитную индукцию и толщину образца в направлении магнитного поля. На рис.6.2 приведена схема лабораторного стенда для измерения указанных характеристик.



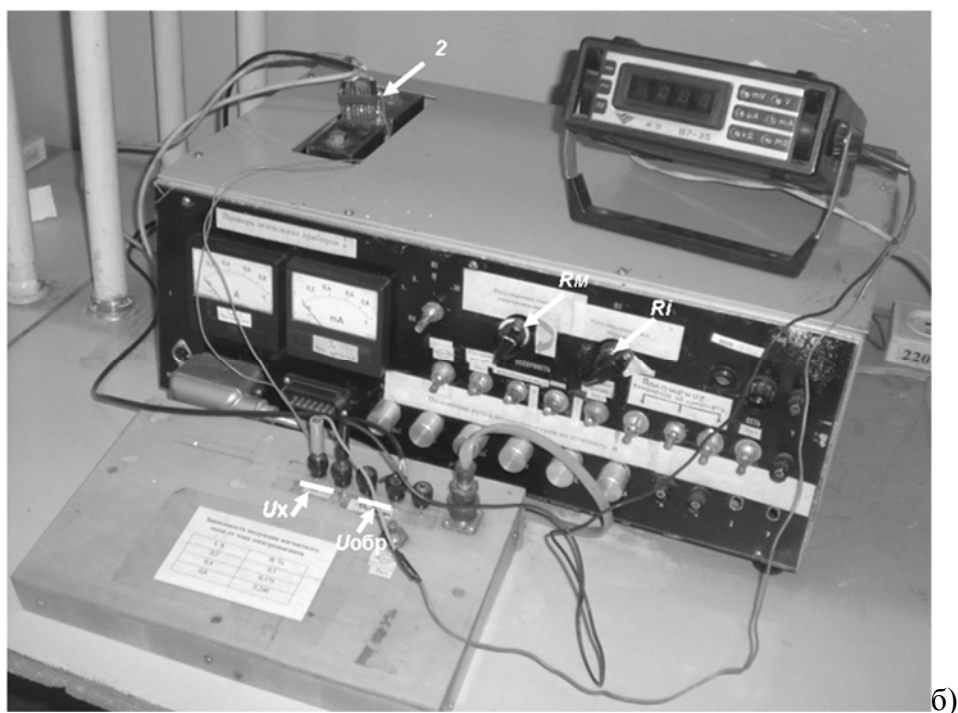


Рис.6.2. Схема (а) и общий вид измерительного стенда(б).

Рассмотрим порядок проведения измерений. Образец 1 устанавливается на измерительную плату 2 выполненную из стеклотекстолита и фиксируется токовыми контактами 3, 4. Для улучшения качества контакта между контактным винтом и образцом помещается прокладка из индия 5. Холловские контакты 6, 7 выполненные из вольфрама устанавливаются на боковых гранях образца. В обоих случаях требуется проверка надежности электрического контакта. Образец с измерительной платой помещается в зазор электромагнита 8, а проволочные выводы с контактов подключаются к клеммам U_H и $U_{обр}$. измерительного стенда. Величина и полярность тока через электромагнит соответственно устанавливаются потенциометром R_M и переключателем ПМ. Значение магнитной индукции определяется по току через электромагнит. Ток через образец I задается с помощью потенциометра R_I , а направление тока меняется переключателем ПТ. ЭДС Холла измеряется вольтметром с входным сопротивлением не ниже 10^8 Ом. При измерениях U_H необходимо учитывать вклад паразитных ЭДС обусловленных различными факторами. В частности, разность потенциалов на холловских контактах определяется соотношением следующих составляющих:

1. Собственно ЭДС Холла U_H .
2. Термо ЭДС поперечного термогальваномагнитного эффекта $U_{пг}$.
3. Термо ЭДС термомагнитного эффекта $U_{тм}$.
4. Термо ЭДС термогальванического эффекта $U_{тг}$.

5. Разность потенциалов, возникающая за счет расположения холловских контактов на не эквипотенциальных поверхностях образца U_0 .

В общем случае, измеряемая разность потенциалов равна сумме пяти составляющих. Для всевозможных сочетаний направлений тока и магнитного поля можно получить следующую систему уравнений

$$\begin{aligned}U_1 &= U_X + U_{ПТ} + U_{ТГ} + U_{ТМ} + U_0, \quad (+I; +B) \\U_2 &= -U_X - U_{ПТ} + U_{ТГ} + U_{ТМ} - U_0, \quad (-I; +B) \\U_3 &= U_X + U_{ПТ} - U_{ТГ} - U_{ТМ} - U_0, \quad (-I; -B) \\U_4 &= -U_X - U_{ПТ} - U_{ТГ} - U_{ТМ} + U_0, \quad (+I; -B).\end{aligned}\quad (6.13)$$

Комбинируя уравнения несложно получить

$$U_X + U_{ПТ} = (U_1 - U_2 + U_3 - U_4)/4 \quad (6.14)$$

Из (6.14) следует, что четыре измерения при различных направлениях тока и магнитного поля позволяют избавиться от паразитных ЭДС за исключением вклада поперечного термогальваномагнитного эффекта, вклад которого может составлять примерно 10% от U_H .

Таким образом, для измерения ЭДС Холла при заданных I и B_z необходимо провести четыре замера U_H при различных направлениях тока и магнитного поля. По результатам измерений U_H рассчитывается значением R_H , которое в дальнейшем используется для оценки концентрации носителей заряда.

IV. Порядок выполнения и указания по технике безопасности

1. Ознакомиться с описанием измерительного стенда и проверить надежность заземления измерительных приборов.
2. Установить образец в измерительную ячейку и проверить надежность электрического контакта образца с холловскими зондами и токовыми выводами.
4. Установить измерительную ячейку в зазор электромагнита и изолировать токоведущие части от корпуса
5. Провести коммутацию токовых выводов и холловских контактов с измерительным стендом.
6. Включить питание цепи образца и установить ток $I = 5 \text{ мА}$.
7. Проверить неэквипотенциальность размещения холловских зондов по результатам измерения U_0 . При необходимости добиться уменьшения U_0 до $0,1 \text{ мВ}$.
8. Установить ток через электромагнит равный $0,1 \text{ А}$ и провести измерения разности потенциалов U_1, U_2, U_3, U_4 на холловских контактах при токе через образец $1 \text{ мА}, 2 \text{ мА}, 3 \text{ мА}, 4 \text{ мА}$ и 5 мА . Результаты измерений представить в виде таблицы 6.1.

Таблица 6.1

№ образца	Ток эл-магнита	Ток образца	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U _Х +U _{ПГ}

Измерения по п.8 повторить при токе через электромагнит равном 0,2 мА, 0,3 мА, 0,4 мА 0,8 мА.

V. Методика обработка и представления результатов измерений

1. Построить графики зависимостей $U_H=f(I)$, при $B_Z=const$; $U_H=f(B_Z)$ при $I=const$.
2. Для каждого измеренного значения U_H по (6.12) рассчитать R_H .
3. Используя редактор Microsoft Exell, рассчитать среднее значение и погрешность определения постоянной Холла для исследуемого образца с использованием t-критерия Стьюдента для 95% доверительного интервала:.

$$R = \bar{R} + t \cdot \sigma_R$$

где \bar{R} -среднее значение постоянной Холла ; σ_R - среднеквадратичное отклонение; t - критерий Стьюдента для 95% доверительного интервала.

4. Используя полученные данные рассчитать концентрацию и определить знак носителей заряда исследуемых образцов.

VI. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Описание методики измерения.
2. Результаты измерений и их представление в графической форме.
3. Результаты расчета постоянной Холла и расчет концентрации носителей заряда.

VII. Примерные контрольные вопросы и задания для допуска и сдачи работы

1. Какие внешние силы приводят к возникновению эффекта Холла?
2. Критерии слабых и сильных электрических и магнитных полей.
3. Как связаны коэффициент Холла и концентрация носителей заряда в случае примесной и собственной проводимости?
4. Дайте определение дрейфовой и холловской подвижности носителей зарядов.
5. Дайте определение Холл-фактора. Как зависит R_H от степени вырожденности полупроводника, величины магнитного поля и механизма рассеяния носителей заряда?
6. Можно ли определить подвижность носителей заряда по измерениям U_H и R_H в области собственной проводимости?

7. Каким образом геометрия образцов влияет на точность измерения напряжения Холла?
8. Какие требования предъявляют к холловским и токовым контактам при измерениях R_H .
9. Какое входное сопротивление должны иметь измерительные приборы (потенциометр, цифровой вольтметр) при измерениях U_H ?
10. Какие физические эффекты дают дополнительные поперечные ЭДС при измерении ЭДС Холла?

VIII. Литература

1. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов - М.: Высшая школа, 1975. С.27-29, 44-45, 48-56, 61-65.
2. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла - М.: Советское радио, 1974. С.62-82.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

I. Цель работы

Изучение магнитных свойств электротехнической стали, пермаллоя и феррита при помощи исследования петель гистерезиса и основной кривой намагничивания.

II. Теоретические основы метода

Магнитными свойствами обладают все вещества в природе, но проявляются они различно. В одних материалах магнитные свойства сильно выражены, а других слабо. Поэтому вещества делят на сильномагнитные и слабомагнитные (немагнитные).

Основанием для деления веществ послужило различие в их магнитной проницаемости μ , определяемой из соотношения:

$$B = \mu H,$$

где B – магнитная индукция в веществе; H – напряжённость внешнего магнитного поля. Для ферромагнетиков (сильномагнитные) μ значительно больше единицы, а для парамагнетиков (слабомагнитные) она лишь немного больше единицы.

Особенности намагничивания различных групп материалов во внешнем магнитном поле схематически представлены на рис. 11.1.

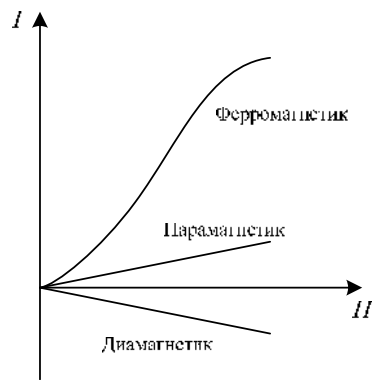


Рис.11.1. Кривые намагничивания

У ферромагнетиков при увеличении напряженности внешнего поля намагниченность растет нелинейно, то есть их намагниченность I и проницаемость μ зависят от H сложным образом. У пара- и диамагнетиков и при весьма больших H рост намагниченности описывается прямой линией, что указывает на отсутствие зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля. У диамагнетиков намагниченность отрицательна, а это значит, что она направлена навстречу внешнему магнитному полю. Зависимость I и μ от напряженности магнитного поля для железа впервые исследовал профессор Московского университета А.Г. Столетов в 1872 году.

Магнитные свойства веществ определяются наличием или отсутствием в них магнитных моментов. Магнитный момент – это вектор, направленный от северного полюса контура с током или магнита. Он численно равен произведению величины тока на обтекаемую им площадь контура S .

Обращение электрона вокруг ядра атома представляет собой замкнутый ток и у него есть магнитный момент. Направление движения электронов противоположно току. Поэтому магнитный момент орбитального тока $M_{орб}$ и механический момент количества движения электрона по орбите $N_{орб}$ направлены в противоположные стороны, как показано на рис.11.2.

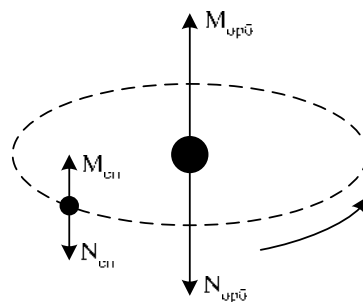


Рис. 2 Образованию магнитного момента атома

Орбитальный момент электрона, находящегося на ближайшей к ядру орбите имеет наименьшее значение, называемое магнетоном Бора и равное

$$\frac{e\hbar}{2mc},$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, c – скорость света, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h – постоянная

Планка). Орбитальный магнитный момент электрона, находящегося на орбите с номером n , в n раз больше магнетона Бора. Аналогичным образом возрастает и его механический момент.

Из-за вращения электрона вокруг собственной оси он обладает спиновым магнитным моментом $M_{сп}$. На рис.11.2 эти моменты показаны как параллельные орбитальным, хотя это и не всегда имеет место. Магнитный спиновый момент равен магнетону Бора.

Механический спиновый момент вдвое меньше наименьшего механического орбитального момента. Магнитный момент атома составляет геометрическую сумму соответствующих орбитальных и спиновых моментов всех его электронов. Орбитальный магнитный момент равен

$$M_{orb} = \frac{|e|\hbar^2}{4\pi m} \sqrt{l(l+1)},$$

где e , m – заряд и масса электрона, а l – орбитальное квантовое число.

Спиновый магнитный момент равен

$$M_{сп} = \frac{|e|\hbar}{2m} \cdot \frac{h}{2\pi} = 9,273 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} / \text{мг}$$

Магнитный момент атома может быть нулевым, либо отличаться от нуля. Когда магнитный момент атомов или молекул вещества отличается от нуля, это вещество называют парамагнетиком, а при нулевом моменте – диамагнетиком.

Атом парамагнетика можно рассматривать как маленький магнетик. Внешнее магнитное поле ориентирует каждый его атом так, чтобы его магнитный момент был направлен по силовым линиям магнитного поля. Индукция B в веществе увеличивается за счет намагниченности, создаваемой ориентированными атомами. Ориентация атомов парамагнетика далеко не полная, так как его намагниченность разрушается тепловым движением, препятствующим ориентации магнитных моментов атомов.

У атомов диамагнетиков магнитный момент равен нулю, поэтому внешнее магнитное поле не может их ориентировать. Однако в магнитном поле диамагнетик немного намагничивается, но в противоположном направлении воздействию магнитному полю. Причина этого явления связана с эффектом электромагнитной индукции. При воздействии

внешнего магнитного поля электрон на орбите ускоряется или тормозится. Это вызывает согласно правилу Ленца появление суммарной встречной намагниченности. Более строгая теория объясняет это явление прецессионным движением электронных орбит.

Ферромагнетизм возникает лишь в веществах, находящихся в кристаллическом состоянии. Отдельный атом ферромагнитного вещества ничем существенно не отличается от атома парамагнитного. Но в кристалле ферромагнетика возникает сильная спонтанная намагниченность, вызываемая тем, что в соседних атомах спиновые магнитные моменты электронов ориентируются параллельно друг другу. Кроме того, ферромагнитное состояние возникает в кристаллах, в которых атомы расположены в определенном порядке. Между соседними атомами возможен обмен электронами, попадающими в сферу действия то одного, то другого атома. Этот процесс вызван так называемыми «обменными силами» и они заставляют часть электронов в соседних атомах ферромагнетика ориентироваться так, что их спиновые моменты становятся параллельными друг другу. Это соответствует минимуму потенциальной энергии кристалла. В парамагнетиках нет параллельной ориентации моментов соседних атомов и появляется лишь небольшая составляющая магнитного момента в направлении поля, поэтому их намагниченность значительно меньше, чем у ферромагнетиков.

На рис. 11.3 изображена элементарная ячейка кристалла железа.

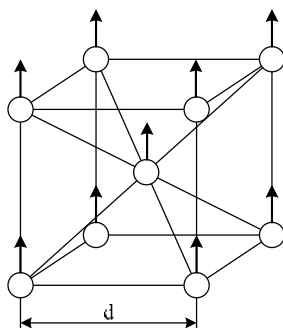


Рис. 11.3. Элементарная ячейка кристалла железа

Ориентация спинов идет вдоль ребер куба по направлению оси легкого намагничивания. Всякому другому направлению ориентации спинов соответствует большая потенциальная энергия кристалла. Особенно велика эта энергия при их ориентации вдоль диагонали куба (направление трудного намагничивания). Диагонали граней куба называются направлениями среднего намагничивания.

Казалось бы, что любой ферромагнетик всегда должен быть намагничен до насыщения даже в отсутствии внешнего поля. Но это не так, поскольку кристалл разбивается на множество микрообъемов (порядка 10^{-7} см^3) – областей самопроизвольного намагничивания или доменов. Домены намагничены до насыщения, но в разных направлениях намаг-

ниченность соседних доменов взаимно компенсируется. В этом случае магнитный поток замыкается внутри образца и энергия его минимальна.

Ферромагнетизм существует лишь у нескольких элементов периодической системы Менделеева. Обменные силы ориентируют спины параллельно друг другу только в определенных случаях. Для ориентации требуется наличие нескомпенсированных спинов на недостроенных внутренних электронных оболочках атомов.

Электроны, как известно, располагаются вокруг ядра атома слоями или оболочками. В заполненной оболочке все электроны образуют пары с противоположно направленными спиновыми моментами (рис.11.4а).

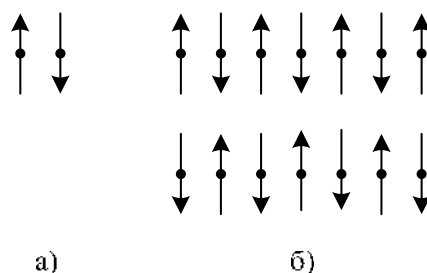


Рис.11.4 К схеме образования нескомпенсированных спиновых магнитных моментов.

Такие связанные попарно электроны уже не могут принимать участие в образовании ферромагнитного состояния. Если же оболочка не заполнена целиком, то часть электронов остается с нескомпенсированными спиновыми моментами. Именно они являются источниками обменных сил, эти обменные силы могут ориентировать спины соседних атомов параллельно друг другу. У железа в оболочке 14 электронов, из них 9 имеют ориентацию спинов в одном направлении, а 5 – в противоположном. Следовательно, 4 спина остаются нескомпенсированными (рис. 4б). Наличие последних на незаполненной внутренней оболочке еще не является достаточным условием для возникновения ферромагнетизма. Требуется выполнение еще одного условия, а именно, атомы в узлах кристаллической решетки должны быть расположены не очень близко один от другого при этом отношение постоянной кристаллической решетки d (см. рис.11.3) к радиусу орбиты R , на которой находится электрон с нескомпенсированным спином должно быть не меньше трех. Так, например, у хрома и марганца имеются соответственно 4 и 5 нескомпенсированных спинов на той же, что и у железа, оболочке, однако они оба неферромагнитны, т.к. для их кристаллов второе условие не выполняется.

Тепловое движение атомов препятствует параллельной ориентации спинов и при некоторой температуре, называемой точкой Кюри, они уже не могут оставаться ориентированными параллельно; при этом ферромагнетизм исчезает.

Одним из характерных свойств ферромагнитных материалов является нелинейность кривой намагничивания, т.е. зависимости намагниченности I от напряженности поля H . Физическая природа намагничивания на отдельных этапах процесса различна и условно поделена на 4 этапа.

На участке 0–1 в слабых полях происходит лишь очень небольшое смещение границ между соседними доменами (рис.11.5).

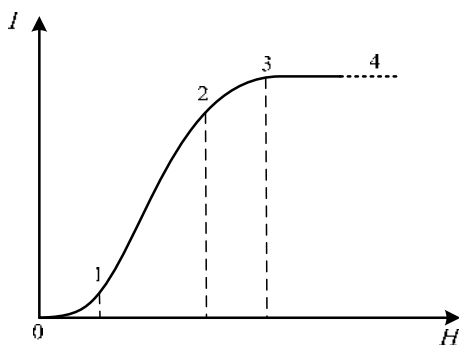


Рис. 11.5. К физической природе намагничивания

Между доменами 1 и 2 имеется граничный слой шириной порядка 30 – 100 диаметров атомов. Ориентация спинов этого слоя постепенно меняется по мере приближения к границам доменов (рис.11.6а).

При наложении слабого магнитного поля спины в граничном слое меняют свою ориентацию, совпадая с направлением поля, или приближаясь к нему. Это приводит, а смещению всего граничного слоя в направлении приложенного поля (рис.11.6б), увеличению объема домена 1 с благоприятной ориентацией спинов и уменьшению объема домена 2 с неблагоприятной ориентацией.

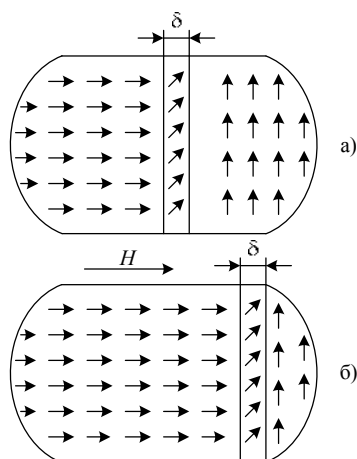


Рис. 11.6. К магнитной структуре доменов

Этот процесс приводит к появлению небольшой намагниченности образца. Если магнитное поле снять, то образец возвращается в исходное состояние. При дальнейшем увеличении напряженности приложенного поля (участок 1–2 кривой) начинаются скачкооб-

разные необратимые смещения границ между доменами. Границы начинают двигаться с довольно большой скоростью, перемещаются в ряде случаев через весь домен и он целиком перемагничивается. Это процесс вращения отображен участком кривой 2–3. После его завершения наступает так называемое техническое насыщение образца, ему соответствует участок 3–4 кривой. Намагниченность меняется теперь мало и только за счет увеличения числа спинов, ориентирующихся параллельно. Данный процесс называют парапроцессом по аналогии с намагничением парамагнетиков

Особо оговорим важную деталь. Обсуждавшиеся выше магнитные домены не есть кристаллики микроструктуры металла. Магнитные домены формируются независимо от микрокристаллической структуры ферромагнетиков.

Основные магнитные характеристики. Магнитный момент тела M равен произведению намагниченности I на объем тела V :

$$M = I \cdot V$$

Способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля напряженностью H характеризуется магнитной восприимчивостью χ :

$$I = \chi \cdot H$$

Результирующее магнитное поле в веществе называют магнитной индукцией B . Она связано с напряженностью внешнего магнитного поля H и намагниченность вещества I соотношением

$$B = H + 4\pi I$$

Способность вещества менять свою индукцию B при воздействии внешнего поля H характеризуется магнитной проницаемостью μ :

$$B = \mu \cdot H$$

Магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью соотношением:

$$\mu = 4\pi\chi + 1$$

Для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности и других электромагнитных устройств применяются сильномагнитные материалы ($\mu \gg 1$). Такими материалами являются ферромагнетики и ферриты, кривая намагничивания которых показана на рис.11.5. Из кривой намагничивания можно рассчитать и построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля. Магнитная проницаемость, измеряемая в слабых полях (при $H \rightarrow 0$), называется начальной. Начальная магнитная проницаемость является важнейшей характеристикой магнитомягких материалов. При увеличении напряженности поля магнитная проницаемость сначала растет, что связано со сверхлинейной зависимостью смещения доменных границ от H и с увеличением вклада процессов

вращения. При напряженности поля H , соответствующего участку 2–3 на рис. 11.5 магнитная проницаемость максимальна, а затем падает из-за насыщения магнитной индукции при $H \rightarrow \infty$ и $\mu \rightarrow 1$. Если после намагничивания образца до насыщения внешнее поле медленно уменьшить до нуля, то индукция в нуль не обратится, а примет значение B_r (рис.11.7), называемое остаточной индукцией. Остаточная индукция вызвана сориентированными при максимальной напряженности поля H доменами, которые затем зафиксировали свое состояние силами металлических связей. Сами они вернуться в исходное состояние уже не способны, этому противодействуют прочностные свойства материала. На них необходимо воздействовать внешним магнитным полем противоположного направления. Чтобы уменьшить индукцию до нуля, необходимо приложить обратно направленное поле напряженностью H_c , называемое коэрцитивной силой. В зависимости от значения H_c ферромагнетики делят на магнитомягкие и магнитотвердые.

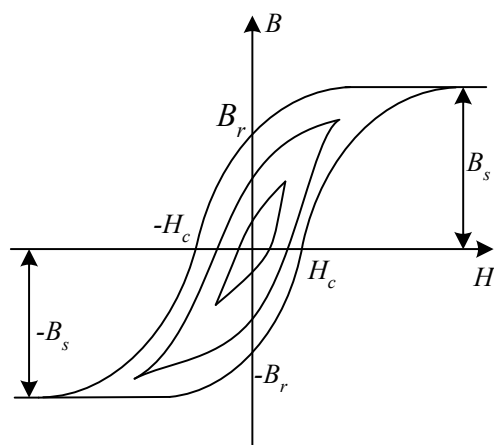


Рис.11.7. Гистерезис намагничивания

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых $H_c < 800$ А/ма, а магнитотвердыми с $H_c > 4$ кА/м. Величины B_r и H_c являются параметрами статической предельной петли гистерезиса, т.е. ПГ, полученной при медленном циклическом перемагничивании намагниченного до насыщения образца. Площадь статической ПГ характеризует потери энергии на гистерезис, обусловленные необратимыми процессами смещения и вращения за один цикл перемагничивания. При достаточно быстром изменении H по величине и знаку зависимость $B(H)$ описывает динамическую ПГ. При намагничивании до одинакового предельного значения индукции площадь динамической ПГ металлических ферромагнетиков больше площади статической ПГ на величину, характеризующую потери энергии на вихревые токи.

Магнитомягкие ферриты (т.е. ферриты, обладающие достаточно большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой) применяются в качестве материалов для

изготовления сердечников электромагнитных устройств, работающих в диапазоне радиочастот. Достоинством их по сравнению с металлическими магнитными сердечниками в данном случае является большое удельное сопротивление ρ , что препятствует индуцированию вихревых токов. Поэтому в широком диапазоне частот магнитная проницаемость ферритов остается постоянной (рис. 11.8), а потери энергии на перемагничивание практически обусловлены только потерями на гистерезис.

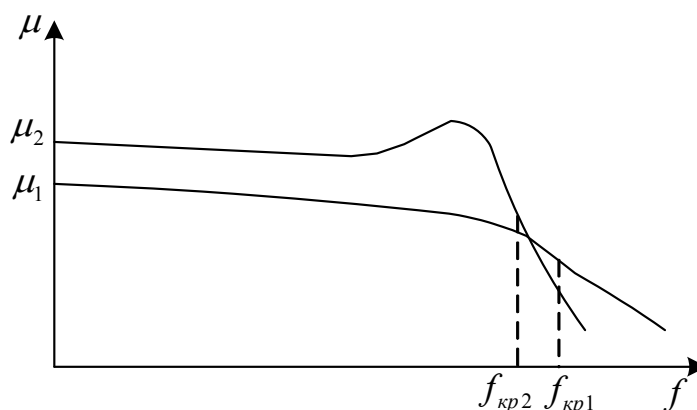


Рис.11.8. Частотная зависимость магнитной проницаемости

Спад магнитной проницаемости феррита при частотах выше некоторого критического значения $f_{кр}$ обуславливается инерционностью процессов перемагничивания, а вихревые токи не вносят существенного вклада в зависимость $\mu(f)$. У некоторых ферритов существенный вклад в дисперсию μ (т.е. в ее частотную зависимость) вносят резонансные процессы колебания. Тогда спаду кривой $\mu(f)$ может предшествовать сравнительно небольшой резонансный максимум (см. рис. 11.9, кривая μ_2).

Наибольшими значениями начальной магнитной проницаемости обладают марганец-цинковые ферриты (двухвалентный металл в составе феррита, при этом марганец и цинк в разных процентных соотношениях). Поликристаллические марганцево-цинковые ферриты изготавливаются с начальной магнитной проницаемостью от 700 (марка 700 НМ) до 20000 (марка 20000 НМ). Наряду с марганцево-цинковыми ферритами, широкое применение в диапазоне частот от единиц килогерц до нескольких мегагерц находят также никель-цинковые ферриты. Максимальным значением начальной магнитной проницаемости среди этой группы материалов обладает феррит 2000 НН.

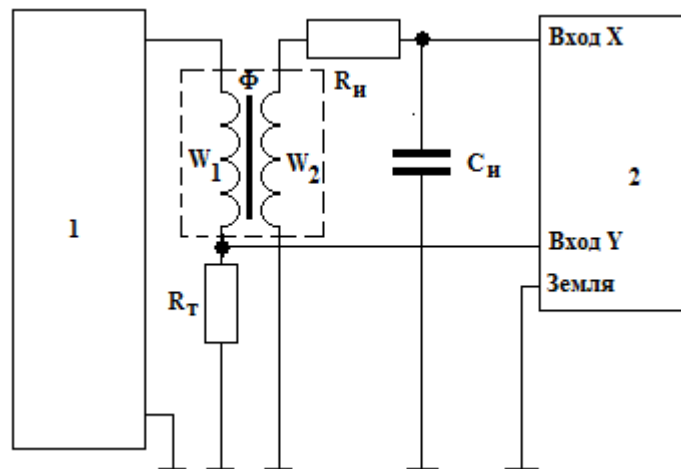
В марках феррита цифра означает величину начальной магнитной проницаемости при низких ($<f_{кр}$) частотах, первая буква Н – «низкочастотный» (т.е. $f_{кр}$ сравнительно невысока), вторая буква указывает состав феррита (М – в состав входит оксид марганца, Н – оксид никеля).

III. Описание лабораторного стенда и методика измерений

Схема испытания приведена на рис.11.10, где Φ – испытуемый сердечник с первичной обмоткой W_1 и вторичной W_2 , 1 - генератор синусоидальных сигналов, 2 – осциллограф, R_T – образцовый («токовый») резистор, R_H и C_H – интегрирующая цепочка. К пластинам горизонтального отклонения осциллографа (вход X) прикладывают напряжение $U_X = U_R$ снимаемое с резистора R_T и пропорциональное току I , протекающему в обмотке W_1 . U_R пропорционально напряженности поля H , поскольку $H = W_1 l(2\pi l_{cp})$, где $2\pi l_{cp}$ - средняя длина линий напряженности поля.

Таким образом, ток от генератора G протекает через обмотку W_1 , резистор R_T и уходит на землю. Падение напряжения на R_T , обозначенное как U_R , так же связано с током, как и создаваемое на оси катушки магнитное поле. В это магнитное поле напряженностью H помещен исследуемый нами ферромагнетик. Следовательно, величина $U_X = U_R$ отображается на горизонтальной оси осциллограммы.

Магнитное поле H , созданное катушкой W_1 , наводит в ферромагнетике Φ внутреннее поле, в μ раз более мощное, это индукция B . Обнаруживается она по воздействию на вторичную катушку W_2 , с которой течет ток по цепи через интегрирующую цепочку R_H, C_H на землю.



a)

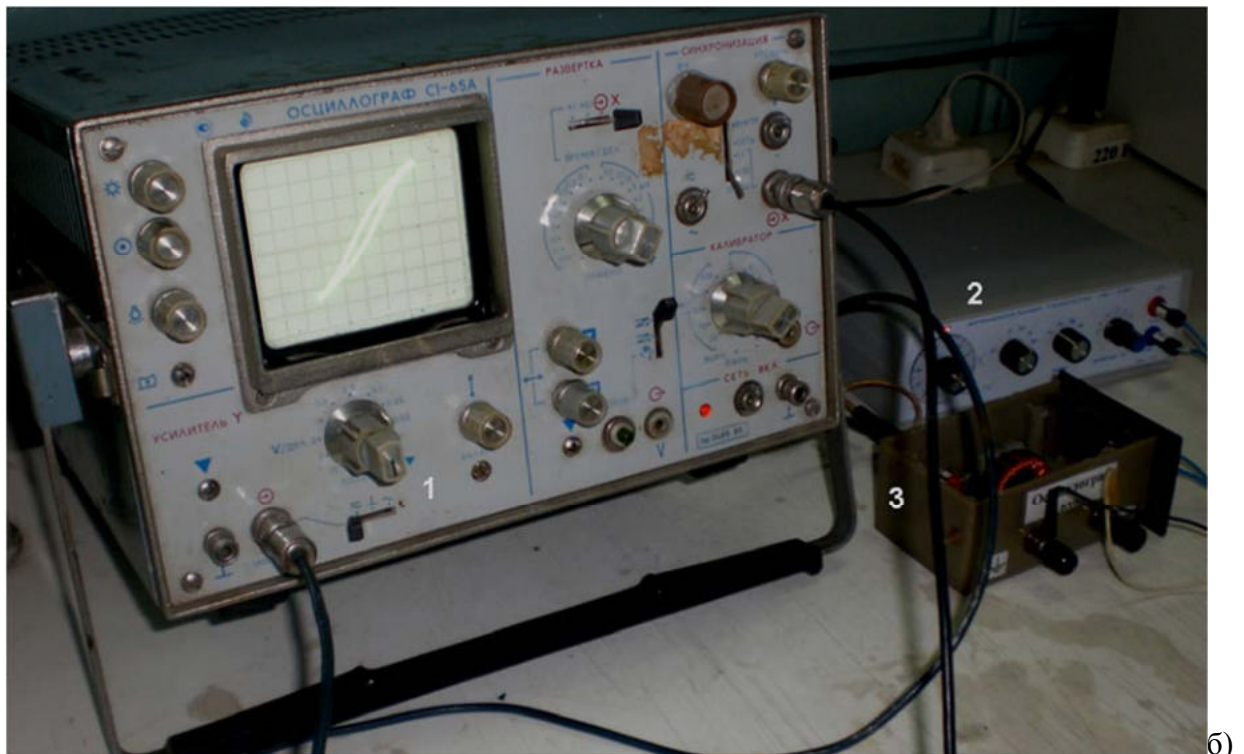


Рис.10. Схема и общий вид лабораторного стенда: 1-осциллограф; 2-генератор; 3-испытуемый сердечник по вторичной обмотке подключенный к интегрирующей цепочке.

На вертикальный вход осциллографа (вход Y) подают напряжение $U_y = U_c$, снимаемое с конденсатора интегрирующей цепочки C_u , которое определяется выражением

$$U_i = \frac{1}{C_u} \int i_u ,$$

где i_u - ток в интегрирующей цепочке.

Если $R_u \gg 1/\omega C_u$, то $I_u = E_2 / R_u$, где E_2 – ЭДС во вторичной обмотке. Согласно закону Ленца $E_2 = W_2 S (dB/dt)$, где S – сечение магнитного образца.

С учетом выражений для U_i и I закон Ленца можно выразить так

$$U_c = \frac{1}{R_u C_u} \int E_2 dt = \frac{W_2 S B}{R_u C_u} ,$$

т.е. напряжение U_c пропорционально индукции в образце.

При одновременном приложении напряжений U_R и U_C к пластинам осциллографа на его экране получится петля гистерезиса, характеризующая зависимость $B=f(H)$ на переменном сигнале (см. рис.11.11.)

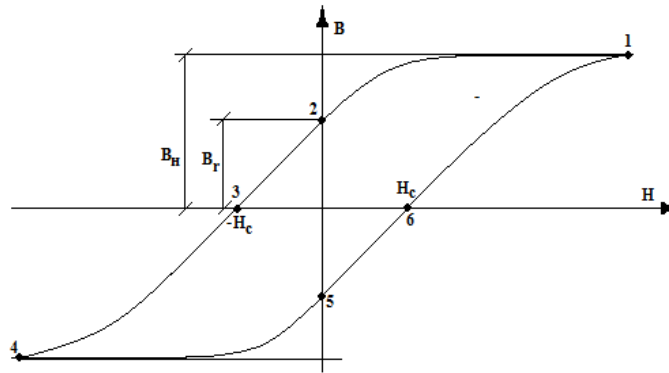


Рис.11.11. Схема осциллограммы зависимости $B=f(H)$ на переменном сигнале

IV. Порядок проведения работы и указания по технике безопасности

1. Соедините выход генератора с гнездом G измерительного стенда, а входы каналов X и Y осциллографа соедините с гнездами X и Y измерительного стенда соответственно.
2. Ручки переключения коэффициентов усиления каналов X и Y осциллографа поставьте в положения 50 мВ/дел и 20 мВ/дел. соответственно ($U_X = 50$ мВ, $U_Y = 20$ мВ).
3. Проверьте заземление и включите приборы в сеть. Прогрейте в течение 5 мин.
4. С помощью ручек осциллографа С1-69 добейтесь положения луча в центре экрана. Установите частоту сигнала генератора ФГ-5 50 Гц. При помощи регулятора выхода генератора получите на экране осциллографа предельную петлю гистерезиса.
5. Изменяя величину сигнала на выходе генератора, зарисуйте семейство петель гистерезиса и запишите в таблицу 11.1. координаты их вершин при $X=1;2;3;4$ деления.

Таблица 11.1

X, дел	H_m , А/м	Y, дел.	B_m , Тл	μ

V. Методика обработка и представления результатов измерений

1. Рассчитайте масштабы осей осциллографа по формулам:

$$m_x = \frac{U_x W_1}{2\pi r_{cp} R_T}, \frac{\text{А}}{\text{м}} / \text{дел}; \quad m_y = \frac{U_y C_{и} R_{и}}{W_2 S}, \text{Тл/дел}$$

Для расчета взять следующие значения: $R_T=10 \text{ Ом}$; $r_{cp}=0,021 \text{ м}$; $W_1=100$; $W_2=1330$; $C_{и}=10^{-6} \text{ Ф}$; $R_{и}=10^{-5} \text{ Ом}$; $S=10^{-4}$.

Напряженность поля и магнитная индукция в образце, соответствующие отклонению луча осциллографа в точке с координатами (X,Y) равны

$$H_m = m_x X; \quad B_m = m_y Y.$$

Значение магнитной проницаемости по данным осциллографических исследований вычисляется из основной кривой намагничивания согласно выражению: $\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

2. Результаты расчета занесите в таблицу 11.1 и постройте по ним основную кривую намагничивания и зависимость $\mu(H)$.

VI. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Методику измерений.
2. Первичные результаты замеров и осциллограмму гистерезиса намагничивания.
3. Результаты расчета магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника.
4. Анализ полученных результатов в сравнении со справочными данными.

VII. Примерные контрольные вопросы и задания для допуска и сдачи работы

1. Каким образом на экране осциллографа можно получить петлю гистерезиса?
2. Какие механизмы перемагничивания обуславливают гистерезисные свойства ферромагнетиков?
3. Объясните зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.
4. Чем отличаются динамические кривые намагничивания от статических? Какие кривые снимались в данной работе?
5. Что характеризует площадь ПГ?
6. Назовите основные виды потерь в ферромагнитных сердечниках. Какие потери и почему более опасны на высоких частотах?
7. Как объяснить влияние частоты на значение магнитной проницаемости металлического ферромагнетика?
8. Что представляет собой феррит и почему ферритовые сердечники можно использовать на высоких частотах?
9. Объясните ход кривой намагничивания и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
10. Назовите области применения ферритов.

VIII. Литература

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учеб. – М.: Высш. шк., 1986. С. 277-320.

2. В.Н. Джуплин, Ю.Н. Варзарёв, В.В. Поляков Руководство к лабораторным работам по курсам «Материаловедение и материалы электронных средств», «Материалы и элементы электронной техники», «Материалы электронной техники» - Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2004, с.23-35.

Примерная база для тестирования

1 контрольная точка

S: Взаимодействие атомов в кремнии преимущественно носит ... характер химической связи.

+: ковалентный

-: ионный

-: дисперсионный

I: 2

S: ... -способность атомов отдавать или принимать валентные электроны при их взаимодействии.

+: электроотрицательность

I: 3

S: Связь, образованная электронами с разных электронных подуровней называется:...

+: гибридной

I: 4

S: Угол между направлениями связывающихся орбиталей называется ...

+: валентным углом

I: 5

S:

В образовании одиночной ковалентной связи участвуют ... электрона

+: два

+: 2

I: 6

S:

Ковалентная связь характеризуется насыщенностью и ...

+: направленностью

I: Задание {{8}} Химическая связь КТ=; МТ=;

S:

...-сильно поляризованная ковалентная связь.

+: ионная связь

I: 7

S:

При образовании ... связи происходит обобществление валентных электронов взаимодействующих атомов в объеме всего кристалла.

+: металлической

I: 8

S:

Силы, возникающие между дипольными молекулами, называются:...

+: ориентационными

-: индукционными

-: дисперсионными

I: 9

S:

Взаимодействие атомов в кремнии преимущественно носит ... характер химической связи.

+: ковалентный

-: ионный

-: дисперсионный

I: 10

S:

Взаимодействие атомов в натрии носит ... характер химической связи.

-: ионный

-: дисперсионный

+: ковалентный

I: 11

S:

Химическая связь в арсениде галлия носит преимущественно ... характер.

+: ковалентный

-: металлический

-: дисперсионный

-: ионный

I: 12

Q: Расставить химические соединения по степени возрастания доли ионной связи

1: D1: Pete

2: D2: PbSe

3: D3: PbS

I: 13

Q: Привести в соответствие

L1: хлористый натрий

R1: ионный кристалл

L2: германий

R2: ковалентный кристалл

L3: сухой лед

R3: молекулярный кристалл

I: 14

Q: Привести в соответствие

L1: InSb

L2: Pt

L3: SiO₂

R1: полупроводник

R2: металл

R3: диэлектрик

I: 15

S: Материал, составляющий основу современных интегральных схем

+: кремний

-: германий

-: золото

-: селен

I: 16

S: Материал на основе которого был изготовлен первый полупроводниковый транзистор

-: кремний

+: германий

-: арсенид галлия

I: 17.

S: Материал, на котором изготавливаются диоды Ганна

-: кремний

-: германий

+: арсенид галлия

I: 18

Q: Привести в соответствие

L1: Стекло

L2: Поликристалл

L3: Монокристалл

R1: Отсутствует дальний порядок

R2: Присутствует ближний и дальний порядок

R3: дальний порядок сохраняется по всему объёму тела

I: 19

Q: Привести в соответствие

L1: Эпитаксиальная пленка

L2: Отоженная пленка, полученная вакуумно-термическим распылением

L3: Пленка полученная вакуумно-термическим распылением на холодную подложку

R1: Характеризуется монокристаллической атомной структурой

R2: Характеризуется поликристаллическим строением

R3: Характеризуется аморфным строением

I: 20

Q: Привести в соответствие

L1: Кристалл

L2: Аморфное вещество

L3: Стекло

R1:

R2:

R3:

I: 21.

S: Главная задача полупроводникового материалдоведения

+: Создание технологии получения материалов с заданными свойствами

-: Создание технологии получения материала со сверхпроводниковыми свойствами при комнатной температуре

-: Создание технологии получения наноматериалов

I: 23

S:

Коэффициент упаковки ПК кристаллической решетки равен:...

-: 1

-: 0,68

+: 0,52

-: 0,73

I: 24

S:

Коэффициент упаковки ПК кристаллической решетки равен:...

-: 1

-: 0,68

+: 0,52

-: 0,73

I: 25

S:

В ГЦК решетке плоскость ... характеризуется максимальной поверхностной плотностью атомов.

+: (111)

-: (110)

-: (001)

I: 1

S: С увеличением концентрации носителей заряда удельное сопротивление металла.....

-: увеличивается

+: уменьшается

-: остается постоянным

I: 2

S: Дрейфовая скорость-

+: скорость направленного перемещения электронов под действием внешнего электрического поля

-: скорость теплового движения электронов

+: средняя скорость направленного перемещения электронов под действием внешнего элек-

трического поля

-: скорость приобретаемая электроном на длине свободного пробега

I: 3

S: С увеличением температуры длина свободного пробега электрона в металле.....

+: уменьшается

-: увеличивается

-: остается постоянной

-: скачкообразно увеличивается

I: 4

S: Длина свободного пробега электрона в твердом теле -

+: - длина траектории движения электрона между последовательными актами рассеяния

-: - длина траектории дрейфа электрона под действием внешнего электрического поля

-: - длина пути, на котором электрон испытывает более 2 актов рассеяния

I: 5

S: Эффективное сечение рассеяния электронов на атоме с увеличением температуры.....

+: увеличивается

-: уменьшается

-: остается постоянным

I: 6

S: Явление сверхпроводимости было открыто в

+: 1907г.

-: 1957г.

-: 1937г.

-: 1948г.

I: 7

S: В рамках теории БКШ сверхпроводимость металлов объяснялась с позиции образования квазичастицы под названием.....

+: купперовская пара

-: полярон

-: Экситон

I: 8

S: Купперовская пара состоит из

+: двух связанных между собой электронов

-: двух связанных между собой электрона и дырки

-: двух связанных между собой дырок

I: 9

S: Полупроводник, в котором влиянием примесей на электрофизические свойства можно пренебречь называется: ...

+: собственным

+: Собственным

+: собственным полупроводником

+: Собственным полупроводником

+: собственный полупроводник

I: 10

S: Полупроводник, в котором содержание активных примесей сказывается на электрофизических свойствах, называется: ...

- + : примесным
- + : Примесным

I: 11

S: Полупроводник, содержащий как акцепторы, так и доноры называется:...

- + : компенсированным
- + : Компенсированным
- + : Компинсированным
- + : компинсированным

I: 12

S:

Величина численно равная отношению концентрации доноров к концентрации акцепторов называется: ...

- + : степенью компенсации
- + : Степенью компенсации
- + : степенью компенсированности
- + : Степенью компенсированности

I: 13

S: К полупроводникам n-типа относятся полупроводники, в которых основными носителями заряда являются: ...

- + : электроны
- : дырки
- : экситоны
- : поляроны

I: 14

S: К полупроводникам p-типа относятся материалы, в которых основными носителями заряда являются: ...

- : электроны
- + : дырки
- : экситоны
- : поляроны

I: 15

S:

Примесь, добавление которой в полупроводник ... концентрацию электронов называется донорной.

- + : повышает
- : не изменяет
- : уменьшает

I: 16

S: Примесь, добавление которой в полупроводник ... концентрацию дырок называется акцепторной.

- : повышает

-: не изменяет
+: уменьшает

I: 17

S: Примесь, дающая в полупроводнике как акцепторные, так и донорные уровни называется:
...:

+: амфотерной
+: Амфотерной

I: 18

S: Примесь, добавление которой в полупроводник ... концентрацию дырок называется акцепторной.

+: повышает
-: не изменяет
-: уменьшает

I: 19

S: Донорная примесь дает в запрещенной зоне дискретные энергетические уровни, располагающиеся вблизи: ...

+: зоны проводимости
-: валентной зоны
-: середины запрещенной зоны

I: 20

S: Акцепторная примесь дает в запрещенной зоне дискретные энергетические уровни располагающиеся вблизи: ...

-: зоны проводимости
+: валентной зоны
-: середины запрещенной зоны

2 контрольная точка

I: 21

S: Акцепторная примесь дает в запрещенной зоне дискретные энергетические уровни располагающиеся вблизи: ...

-: зоны проводимости
+: валентной зоны
-: середины запрещенной зоны

I: 22

S: При ионизации атом донора заряжается

+: положительно
+: +
+: Положительно

I: 23

S: При ионизации атом акцептора заряжается

+: отрицательно
+: -
+: Отрицательно

I: 24

S: В сильно вырожденном акцепторном полупроводнике уровень Ферми лежит ниже потолка валентной зоны на

-: kT

-: $3kT$

+: $5kT$

I: 25

S: Электронный газ в слаболегированных полупроводниках подчиняется статистике

+: Максвелла - Больцмана

+: максвелла - больцмана

I: 1

S: Магнитные материалы с малой коэрцитивной силой называются

+: магнитомягкими

I: 2

S: Магнитные материалы с большой коэрцитивной силой называются

+: магнитотвердыми

I: 3

S: К магнитотвердым относятся материалы с коэрцитивной силой не менее

+: $4кА/м$

I: 4

S: К магнитомягким относятся материалы с коэрцитивной силой не более

+: $800А/м$

I: 5

S: К магнитомягким относятся:

+: электролитическое железо

-: бариевый феррит

-: самарий –кобальтовые сплавы

I: 6

S: К магнитотвердым относятся:

1. карбонильное железо

2. пермалой

3. самарий –кобальтовые сплавы

I: 7

S: Альсифер - тройной сплав железа с кремнием и алюминием, который используется в качестве магнитных

+: экранов

I: 8

S:

К сильномагнитным материалам относятся:

-: антиферромагнетики

+: ферромагнетики

+: ферримагнетики

-: парамагнетики

-: диамагнетики

I: 9

S:

К слабомагнитным материалам относятся: ...

+: антиферромагнетики

-: ферромагнетики

-: ферримагнетики

+: парамагнетики

+: диамагнетики

I: 10

S: Магнитная восприимчивость диамагнетиков лежит в интервале значений

+: (10^{-6} - 10^{-7})

-: (10^{-3} - 10^{-6})

-: до 10^6

I: 11

S: Магнитная восприимчивость ферро- и ферримагнетиков лежит в интервале значений

-: (10^{-6} - 10^{-7})

-: (10^{-3} - 10^{-6})

+: до 10^6

I: 12

S: Магнитная восприимчивость парамагнетиков лежит в интервале значений

-: (10^{-6} - 10^{-7})

+: (10^{-3} - 10^{-6})

-: до 10^6

I: 13

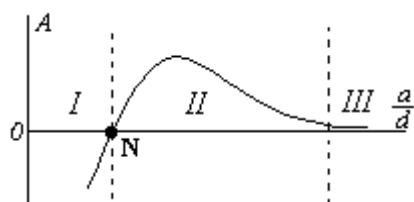
S: Магнитная восприимчивость отрицательна для

+: диамагнетиков

+: диамагнитных веществ

+: веществ с диамагнитными свойствами

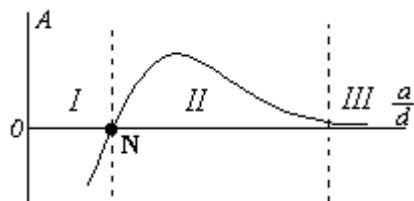
I: 14



S: Приведена зависимость обменного интеграла от отношения межатомного расстояния a к d диаметру незаполненной электронной оболочки. Значение отношения в точке N равно

+: 1,5

I: 15

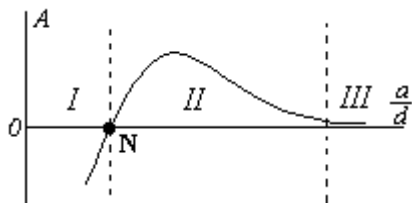


S: Приведена зависимость обменного интеграла от отношения межатомного расстояния a к d диаметру незаполненной электронной оболочки. Материалы

попадающие в область I, характеризуются ...

- + : антиферромагнетизмом
- : ферромагнетизмом
- : парамагнетизмом

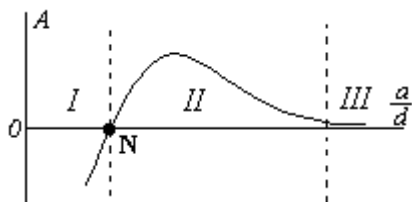
I: 16



S: Приведена зависимость обменного интеграла от отношения межатомного расстояния a к d диаметру незаполненной электронной оболочки. В области II укладываются вещества характеризующиеся ...

- : 1. антиферромагнетизмом
- + : 2. ферромагнетизмом
- : 3. парамагнетизмом

I: 17



S: Приведена зависимость обменного интеграла от отношения межатомного расстояния a к d диаметру незаполненной электронной оболочки. В области III укладываются вещества характеризующиеся ...

- : 1. антиферромагнетизмом
- : 2. ферромагнетизмом
- + : 3. парамагнетизмом

I: 18

S: Количество осей легкого и трудного намагничивания определяется ... кристаллической решетки

- + : симметрией

I: 19

S: Спонтанная магнитострикция возникает при переходе вещества из парамагнитного состояния в ... состояние в процессе охлаждения ниже точки Кюри.

- 1. антиферромагнитное
- 2. ферромагнитное
- 3. диамагнитное

- : 1
- + : 2
- : 3

I: 20

S: Магнитострикция связанная с искажениями кристаллической решетки под действием внешнего поля называется ...

- + : линейной

I: 21

S: Константа магнитострикции обращается в ноль при температуре перехода в ... состояние.

1. антиферромагнитное
2. ферромагнитное
3. парамагнитное

-: 1

-: 2

+: 3

I: 22

S: В тонких пленках ось легкого намагничивания направлена

1. параллельно плоскости пленки
2. перпендикулярно плоскости пленки
3. под углом к плоскости пленки

+: 1

-: 2

-: 3

I: 23

S: Для магнитных пленок толщиной менее 10-3 мм характерна ... структура.

+: однодоменная

I: 24

S: Для получения ЦМД структур используют ферриты с ... осью легкого намагничивания .

+: 1

+: одной

I: 25

S: Основным материалом для получения ЦМД структур является

+: феррогранаты

Перечень вопросов и задач выносимых на контрольные работы

Контрольная работа №1

1. Какие типы химической связи вы знаете?
2. Какими свойствами характеризуется химическая связь?
3. Каким образом реализуются ковалентная и ионная связь?
4. Пользуясь таблицей величин относительной электроотрицательности, вычислить их разность для связей: $K-Cl$, $Ca-Cl$, $Fe-Cl$, $Ge-Cl$. Какая из них характеризуется наибольшей степенью ковалентностью?
5. Как образуются полярная и неполярная ковалентные связи? Приведите примеры молекул.
6. Вычислить разность относительных электроотрицательностей атомов для связей $H-O$ и $O-As$. Какая из связей более полярна? К какому классу гидроксидов относится $As(OH)_3$?
7. Какой параметр используется для количественной оценки полярности связи в молекуле?
8. Как изменяется энергия связи в ряду: $H-F$; $H-Cl$; $H-Br$; $H-I$?
9. Как изменяется длина связи в ряду: $N-H$; $P-H$; $As-H$; $Sb-H$?
10. Сформулируйте основные положения метода валентных связей (ВС).
11. Какие специфические свойства характерны для ковалентной связи?
12. Что такое «насыщаемость» связи? Каково максимальное насыщение связи у элементов 2-го и 3-го периодов и у каких элементов оно реализуется?

13. Охарактеризуйте σ и π ковалентные связи.
14. Чем характеризуется направленность ковалентной связи?
15. Какие вы знаете типы гибридизации связи и какая им соответствует форма молекул? Приведите примеры.
16. Какими типами гибридизации атомных орбиталей кремния и углерода описывается образование молекул SiH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 и иона $[SiF_6]^{2-}$?
17. Сравните способы образования ковалентных связей в молекулах CH_4 ; NH_3 и в ионе NH_4^+ .
18. Как изменяется валентный угол между связями:
 - а) $H-\text{Э}$ (элемент), где Э : O, S, Se, Te ;
 - б) $H-\text{Э}$, где Э : N, P, As, Bi ?
19. Чем объяснить уменьшение энергии связи, температуры плавления и ширины запрещенной зоны у германия по сравнению с кремнием?
20. Как классифицируют типы примесной проводимости полупроводников?
21. Какие легирующие добавки к полупроводникам обуславливают:
 - а) электронную проводимость;
 - б) дырочную проводимость?
22. Как изменяется степень ионности связи в полупроводниках типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ в зависимости от разницы относительной электротрицательности элементов, образующих указанные соединения?
23. Какой тип гибридизации атомных орбиталей характерен для полупроводников $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ и как он реализуется?
24. Какой тип полупроводников: $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$ характеризуется большей полярностью связи?

Контрольная работа №2

1. Какие факторы обуславливают повышенные значения удельного сопротивления тонких пленок в сравнении с объемными образцами?
2. В чем заключается суть правила Линде?
3. Почему удельная электропроводность металлов увеличивается с понижением температуры металла?
4. Почему удельное сопротивление чистого металла повышается при добавлении примесей, даже с более низким удельным сопротивлением?
5. Определить, как и во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами в металле энергетического уровня, расположенного на $0,1 \text{ эВ}$ выше уровня Ферми, если температура металла повысить от 300 до 1000 К .
6. Определить температуру, при которой вероятность нахождения электрона с энергией $W = 0,5 \text{ эВ}$ выше уровня Ферми в металле 1% .
7. Определить минимальную длину волны де Бройля для свободных электронов при $T \approx 0 \text{ К}$ в металле с простой кубической кристаллической решеткой, если на каждый атом кристалла приходится один свободный электрон. Период решетки равен a .
8. Вычислить концентрацию свободных электронов в кристалле меди, если известно, что плотность меди $8,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. При расчете полагать, что на каждый атом кристаллической решетки приходится один электрон.
9. Как изменится интервал δW между соседними уровнями энергии свободных электронов в металле, если объем кристалла уменьшится в 30 раз?
10. Удельное сопротивление серебра при комнатной температуре равно $0,015 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, а температурный коэффициент удельного сопротивления составляет $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Определить, как и во сколько раз изменится длина свободного пробега электронов при нагревании проводника от 300 до 1000 К .

11. Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 1 км по медному проводу, если удельное сопротивление меди $0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, а разность потенциалов на концах проводника $U = 220 \text{ В}$. За какое время электрон пролетит это же расстояние, двигаясь без соударения, при той же разности потенциалов? Каково время передачи сигнала?

12. В металлическом проводнике с площадью поперечного сечения 10^{-2} мм^2 и сопротивлением 10 Ом концентрация свободных электронов равна $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Определить среднюю скорость дрейфа электронов при напряжении $0,1 \text{ В}$.

13. Доказать, что между температурными коэффициентами сопротивления проводника α_R , удельного сопротивления материала α_ρ и линейного расширения α_l существует следующая взаимосвязь $\alpha_R = \alpha_\rho + \alpha_l$

14. Удельное сопротивление меди, содержащий $0,3 \text{ ат } \%$ олово при температуре 300 К , составляет $0,0258 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Определить отношение удельных сопротивлений меди при температурах 300 и $4,2 \text{ К}$.

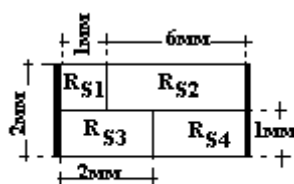
15. Удельное сопротивление медного проводника, содержащего $0,5 \text{ ат } \%$ индия, равно $0,0234 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Определить концентрацию атомов индия в медном сплаве с удельным сопротивлением $0,0298 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, полагая, что все остаточное сопротивление обусловлено рассеянием на примесных атомах индия.

16. Один спай термопары помещен в печь с температурой 200° С , другой находится при температуре 20° С . Вольтметр показывает при этом термо - ЭДС $1,8 \text{ мВ}$. Чему равна термо - ЭДС, если второй спай термопары поместить в сосуд: а) с тающим льдом ? б) с кипящей водой ? Относительную удельную термо - ЭДС во всем температурном диапазоне $0 - 200^\circ \text{ С}$ считать постоянной.

17. При измерении температуры печи хромель – алюмелевой термопарой вольтметр показал 10 мВ . Температура холодного спая термопары стабилизирована на уровне 0° С . Считая, что в заданном температурном интервале коэффициент термо - ЭДС термопары равен 40 мкВ/град определите температуру печи.

18. В цепь включены последовательно медная и нихромовая проволоки равной длины и диаметра. Найти отношение количеств теплоты, выделяющейся в этих проводниках, и отношение падения напряжения на проводах. Удельное сопротивление меди и нихрома равно соответственно $0,017$ и $1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

19. Пленочный резистор состоит из трех участков, имеющих различное сопротивление квадрата пленки $R_{S1}=10 \text{ Ом}$; $R_{S2}=10 \text{ Ом}$; $R_{S4}=40 \text{ Ом}$, $R_{S3}=30 \text{ Ом}$ (см. рис.).



20. Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампочки при 20° С равно 35 Ом . Определить температуру нити лампочки, если известно, что при ее включении в сеть напряжением 220 В , в установившемся режиме по нити проходит ток $0,6 \text{ А}$. Температурный коэффициент удельного сопротивления вольфрама при 20° С принять равным $5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

21. Предположим, что кристалл золота состоит из соприкасающихся твердых сфер радиусом $1,44 \text{ А}$, образующих г. ц. к.-решетку. На каждый атом приходится один свободный

электрон. Электропроводность чистого золота составляет $5 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ при $T = 273 \text{ К}$. Теперь предположим, что в кристалле золота имеется 0,1 % беспорядочно расположенных вакансий. Рассчитайте среднюю длину свободного пробега $\lambda_{\text{деф}}$, определяемую исключительно рассеянием на вакансиях. По известному значению электропроводности оцените среднюю длину свободного пробега для рассеяния на фонах при 273 К и используйте правило Маттиссена для определения электропроводности дефектного кристалла.

Вопросы, выносимые на коллоквиум

1 коллоквиум

1. Какие критерии используются для классификации материалов электронных средств?
2. Классификация материалов по магнитным свойствам и их основные особенности.
3. Классификация полупроводниковых материалов по структуре, типу примеси, уровню содержания примеси.
4. Классификация металлов и металлических сплавов. Кратко описать свойства каждой группы.
5. Схематически описать зонную структуру металлов, полупроводников и диэлектриков.
6. Виды кристаллических систем.
7. Дефекты в твердых кристаллических материалах.
8. Дать классификацию и назначение пассивных компонентов электронных средств.
9. Дать классификацию и назначение активных компонентов электронных средств.
10. Описать модель электропроводности металлов в рамках классического приближения.
11. Особенности электропроводности металлических сплавов. Правило Линде и закон Коппа-Неймана.
12. Припой: классификация, свойства и области применения.
13. Металлы высокой проводимости.
14. Явление сверхпроводимости. Дать краткую характеристику: Сверхпроводники I и II рода.
15. Металлы и металлические сплавы высокого сопротивления.

2 коллоквиум

1. Дайте определение собственного и примесного полупроводника. Изобразите зонную структуру собственного полупроводника, донорного и акцепторного полупроводника.
2. Объясните, как найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда в электронном полупроводнике с известной степенью легирования на участке истощения примеси.
3. Объясните, как найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда в дырочном полупроводнике с известной степенью легирования на участке истощения примеси.
4. Изобразите температурную зависимость равновесной концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике. Объясните, как по этой зависимости определить ширину запрещенной зоны полупроводника.
5. Изобразите качественно температурную зависимость равновесной концентрации электронов в донорном полупроводнике в широком интервале температур. Укажите температуры истощения примеси и перехода к собственной проводимости.
6. От каких характеристик полупроводникового материала зависит температура истощения примеси?
7. Запишите условие квазинейтральности для полупроводника, легированного одновременно донорной и акцепторной примесью.

8. Сколько электронов находится на уровне Ферми в собственном полупроводнике при комнатной температуре?
9. Объясните, какая из дырок обладает большей энергией: в центре валентной зоны или у ее потолка?
10. Установите взаимосвязь между донорным или акцепторным поведением примесей замещения в ковалентных полупроводниках и валентностью примесного атома.
11. Объясните, как определить тип основных носителей заряда в полупроводнике по измерениям ЭДС Холла.
12. Объясните, как определить тип основных носителей заряда в полупроводнике по измерениям термо-ЭДС.
13. Каково отношение электронного тока к дырочному в собственном германии при $T=300\text{ K}$?
14. Каково отношение электронного тока к дырочному в собственном арсениде галлия $T=300$?
15. Всегда ли можно утверждать, что мы имеем дело с собственным полупроводником, если его удельное сопротивление близко к собственному? Почему?
16. Назовите основные механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках. Каковы для этих механизмов температурные зависимости подвижности?
17. Дайте сравнительную характеристику кремния и германия как материалов электроники.
18. Назовите основные области применения кремния и германия в электронной технике.
19. Охарактеризуйте кристаллическую структуру и химическую связь в полупроводниках АШВУ.
20. Почему у антимонида индия собственная удельная проводимость определяется только концентрацией электронов, а вкладом дырок можно практически пренебречь?

Оценочные материалы для промежуточной аттестации

Зачет проводится по билетам. В каждом билете 2 теоретических вопроса.

Экзаменационные вопросы

1. Понятие химической связи. Виды химической связи. Основные особенности и характеристики.
2. Понятие кристаллической решетки. Элементарная ячейка и ее характеристики. Типы кристаллических систем. Решетки Браве. Способ описания кристаллографических плоскостей и направлений
3. Понятие фазы. Фазовая структура твердых тел. Фазовые диаграммы состояния.
4. Основные элементы зонной структуры твердых тел. Энергетические уровни и зоны Особенности энергетических зон полупроводников, металлов и диэлектриков.
5. Понятие фазового пространства. Плотность электронных состояний. Распределение Ферми-Дирака, Максвелла-Больцмана и особенности их применения.
6. Основные положения учения о электропроводности металлов в рамках классического и квантового подходов.
7. Температурная зависимость удельного сопротивления проводников.
8. Влияние структурных дефектов на удельное сопротивление проводников. Правило Матиссена, Нордгейма и Линде.
9. Электрические свойства тонких металлических пленок. Размерный эффект.
10. Основные положения теории БКШ. Понятие туннельного контакта. Особенности ВАХ туннельных контактов - нормальный металл - сверхпроводник и сверхпроводник – сверхпроводник.

11. Металлы высокой проводимости: свойства и применение.
12. Металлы и металлические сплавы высокого сопротивления: свойства и применение.
13. Собственные полупроводники. Статистика носителей заряда. Температурная зависимость уровня Ферми.
14. Примесные полупроводники. Статистика носителей заряда. Температурная зависимость уровня Ферми. Условие электронейтральности.
15. Температурная зависимость электропроводности собственных и примесных полупроводников.
16. Неравновесные носители заряда и механизмы их рекомбинации.
17. Взаимодействие полупроводников с электромагнитным излучением. Механизмы поглощения света полупроводниками. Спектральная зависимость коэффициента поглощения. Край фундаментального поглощения. Закон Бугера – Ламберта - Бера.
18. Фотопроводимость полупроводников. Релаксация фотопроводимости.
19. Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях. Полевые эффекты. Эффект Ганна и области применения
20. Термогальваномагнитные эффекты в металлах и полупроводниковых материалах.
21. Контакт металл-полупроводник: энергетические диаграммы, свойства и применение.
22. Электропроводность простых и сложных диэлектриков. Основные механизмы проводимости.
23. Диэлектрическая проницаемость. Понятие поляризации диэлектриков. Механизмы поляризации.
24. Диэлектрики в сильных электрических полях. Виды электрического пробоя. Понятие электрической прочности диэлектриков.
25. Активные диэлектрики. Применение в изделиях функциональной электроники.
26. Пассивные диэлектрики: классификация, свойства и применение в электронике.
27. Общие сведения о магнетизме. Опыт Герлаха - Штерна. Классификация материалов по магнитным свойствам.
28. Зависимость магнитных свойств ферромагнетиков от внешних факторов. Эффект Баркгаузена. Магнитная точка Кюри.
29. Магнитомягкие материалы: свойства и применение.
30. Магнитотвердые материалы: свойства и применение.