

**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Направление подготовки/специальность: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**

**Наименование образовательной программы: Микроэлектроника и твердотельная электроника**

**Уровень образования: высшее образование - бакалавриат**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Физика твёрдого тела**

**Москва  
2024**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Зезин Д.А.
	Идентификатор	Re7522a00-ZezinDA-ba8dbd73

Д.А. Зезин

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Баринов А.Д.
	Идентификатор	Ra98e1318-BarinovAD-f138ec4f

А.Д. Баринов

Заведующий  
выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Мирошникова И.Н.
	Идентификатор	Rd1db27a5-MiroshnikovaIN-70caf8

И.Н.  
Мирошникова

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-2 Способен осуществлять расчет и проектирование полупроводниковых приборов и устройств, проводить моделирование и анализ с использованием средств автоматизации проектирования

ИД-1 Демонстрирует знание принципов работы, физических и математических моделей основных полупроводниковых приборов

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Билеты (письменный опрос)

1. Контрольная работа № 1 (Контрольная работа)
2. Контрольная работа № 2 (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Защита лабораторной работы №1 «Расчёт зависимости концентрации носителей в полупроводнике и ширины запрещённой зоны полупроводника при помощи эффекта Холла» (Лабораторная работа)
2. Защита лабораторной работы №2 «Измерение чувствительности датчика Холла» (Лабораторная работа)
3. Защита лабораторной работы №3 «Расчёт уровня легирования полупроводника при помощи измерения вольт-фарадных характеристик p-n-перехода» (Лабораторная работа)
4. Защита лабораторной работы №4 «Измерение электропроводности кремниевой пластины четырёхзондовым методом» (Лабораторная работа)
5. Защита лабораторной работы №5 «Изучение процессов рекомбинации и диффузии неосновных носителей заряда» (Лабораторная работа)
6. Защита лабораторной работы №6 «Измерение контактной разности потенциалов на контакте металл-полупроводник» (Лабораторная работа)
7. Защита лабораторной работы №7 «Исследование спектральной зависимости стационарной фотопроводимости» (Лабораторная работа)
8. Защита РГР (5 семестр) (Расчетно-графическая работа)
9. Защита РГР (6 семестр) (Расчетно-графическая работа)

## БРС дисциплины

5 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %							
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6	КМ-7
	Срок КМ:	8	16	16	13	14	15	16

Основные понятия							
Введение. Квантово-механический взгляд на строение твердого тела	+	+					
Представление об атомных орбиталях.	+	+		+	+		
Кристаллическое состояние и его классификация.	+	+		+	+		
Идеальные монокристаллы.	+	+		+	+		
Неидеальные структуры	+	+					
Механические свойства твёрдых тел							
Закон Гука.	+	+					
Распространение акустических волн в кристаллах. Поверхностные акустические волны.	+	+					
Основы зонной теории кристаллических твёрдых тел							
Зоны Бриллюэна. Уравнение Шредингера для твёрдого тела.	+	+					
Число состояний в энергетической зоне.		+					
Приближение эффективной массы.	+	+					
Поверхностные состояния. Водородоподобная модель мелких уровней доноров и акцепторов.	+	+					
Колебания атомов кристаллической решётки. Фононы							
Нормальные колебания.	+	+					
Фононы.	+	+					
Собственные и легированные полупроводники							
Собственные и легированные полупроводники.		+	+			+	+
Статистика электронов и дырок							
Задача статистики.		+	+			+	+
Понятие эффективной массы плотности состояний для электронов.		+					
Функции Ферми и Больцмана распределения электронов по энергиям. Функция распределения Бозе-Эйнштейна.		+					
Определение концентрации электронов и дырок		+	+			+	+

Положения уровня Ферми		+	+			+	+
Определение концентрации электронов и дырок		+	+			+	+
Кинетические явления в полупроводниках							
Теория электропроводности Друде-Лоренца. II		+					
Процессы рассеяния.		+					
Эффект Холла		+					
Вес КМ:	10	10	20	15	15	15	15

6 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-8	КМ-9	КМ-10	КМ-11
	Срок КМ:	4	8	12	16
Генерация и рекомбинация электронов и дырок					
Равновесные и неравновесные носители заряда.		+			
Механизмы рекомбинации.		+			+
Температурная зависимость времени жизни носителей заряда при рекомбинации через рекомбинационные ловушки.		+			+
Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда					
Диффузионные и дрейфовые токи.		+			
Контактные, поверхностные и термоэлектрические явления в полупроводниках					
Полупроводник во внешнем электрическом поле.			+		
Контакт металл-металл.			+		
Контакт металл-полупроводник.			+		
Контакт электронного и дырочного полупроводников.			+		
Гетеропереходы.			+		
Поверхностные состояния.			+		
Кинетические явления в сильных электрических полях.			+		
Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона			+		
Оптические свойства полупроводников					
Взаимодействие электромагнитного излучения с твёрдым телом.				+	+

Собственное поглощение			+	+
Экситонное поглощение.			+	+
Иные виды поглощения			+	+
Люминесценция полупроводников				
Типы люминесценции.			+	+
Релаксация люминесценции полупроводников.			+	+
Фотоэлектрические явления				
Внутренний фотоэффект.			+	+
Релаксация фотопроводимости			+	+
Фотопроводимость при наличии поверхностной рекомбинации и диффузии носителей заряда.			+	+
Эффект Дембера.			+	+
Вес КМ:	20	20	20	40

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-2	ИД-1ПК-2 Демонстрирует знание принципов работы, физических и математических моделей основных полупроводниковых приборов	Знать: основные оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках; основные механизмы процессов генерация и рекомбинация электронов и дырок; механизмы диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда; методы определения концентрации носителей заряда (в том числе графическое), подвижности носителей заряда в зависимости о температуры твердого тела; методы и законы, определяющие зонную структуру твердого тела; контактные, поверхностные и	Контрольная работа № 1 (Контрольная работа) Контрольная работа № 2 (Контрольная работа) Защита РГР (5 семестр) (Расчетно-графическая работа) Защита лабораторной работы №1 «Расчёт зависимости концентрации носителей в полупроводнике и ширины запрещённой зоны полупроводника при помощи эффекта Холла» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №2 «Измерение чувствительности датчика Холла» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №3 «Расчёт уровня легирования полупроводника при помощи измерения вольт-фарадных характеристик р-п-перехода» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №4 «Измерение электропроводности кремниевой пластины четырёхзондовым методом» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №5 «Изучение процессов рекомбинации и диффузии неосновных носителей заряда» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №6 «Измерение контактной разности потенциалов на контакте металл-полупроводник» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №7 «Исследование спектральной зависимости стационарной фотопроводимости» (Лабораторная работа) Защита РГР (6 семестр) (Расчетно-графическая работа)

		<p>термоэлектрические явления в полупроводниках; Уметь: рассчитать концентрации носителей заряда, подвижности носителей заряда в зависимости от температуры и материала твердого тела; рассчитать диффузионные и дрейфовые токи неравновесных носителей заряда; пояснить принцип формирования зонной структуры твердого тела на примере кремния и германия; объяснить основные оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках по спектральным характеристикам. изобразить энергетические диаграммы контактов твердых материалов (металлов, полупроводников в различных комбинациях, в том числе</p>	
--	--	---	--

		гетеропереходов);	
--	--	-------------------	--

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### 5 семестр

#### КМ-1. Контрольная работа № 1

**Формы реализации:** Билеты (письменный опрос)

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдаётся билет с перечнем вопросов, ответы на которые он пишет на бумажном листе. Время проведения контрольной работы - 1 ак. часа.

#### Краткое содержание задания:

Дать краткий ответ на вопросы

#### Контрольные вопросы/задания:

Знать: методы и законы, определяющие зонную структуру твердого тела;	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Кто и в каком году открыл электрон?</li><li>2. Кто и в каком году обосновал планетарную модель строения атома?</li><li>3. Сформулируйте постулаты Бора.</li><li>4. Каков физический смысл волновой функции?</li><li>5. Каков физический смысл модуля квадрата волновой функции?</li><li>6. Каковы свойства волновой функции?</li><li>7. Напишите значения квантовых чисел.</li><li>8. Сформулируйте правило Хунда</li><li>9. Что такое гибридизация атомных орбиталей?</li><li>10. Сформулируйте закон Гука</li></ol>
--	--

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой.

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе.

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий.

## КМ-2. Контрольная работа № 2

**Формы реализации:** Билеты (письменный опрос)

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студенту выдается билет с перечнем вопросов, ответы на которые он пишет на бумажном листе. Время проведения контрольной работы - 1 ак. часа.

**Краткое содержание задания:**

Дать краткий ответ на вопросы

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: методы и законы, определяющие зонную структуру твердого тела;	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Какова основная задача зонной теории?</li><li>2. Напишите выражение закона дисперсии для свободного электрона. Приведите поясняющий график.</li><li>3. Напишите выражение для определения групповой скорости.</li><li>4. Напишите выражение для определения фазовой скорости.</li><li>5. Напишите выражение, связывающее квазиимпульс и волновой вектор.</li><li>6. Напишите выражение для вектора обратной решетки.</li><li>7. Дайте определение зоны Бриллюэна.</li><li>8. Поясните рисунком связь ячейки Вигнера-Зейтца и зоны Бриллюэна для одномерной цепочки атомов.</li><li>9. Напишите выражение для определения объема первой зоны Бриллюэна для кубической решетки в <math>r</math>-пространстве</li><li>10. Напишите выражение для определения объема первой зоны Бриллюэна для кубической решетки в <math>k</math>-пространстве</li><li>11. В чем суть адиабатического приближения или приближения Борна–Оппенгеймера?</li><li>12. В чем суть одноэлектронного приближения или метода Хартри – Фока?</li><li>13. Поясните с точки зрения волновых функций, что такое “синглет”? Триplet?</li><li>14. Что такое “молекулярная орбиталь”? Ответ поясните рисунком.</li><li>15. Какие молекулярные орбитали Вы знаете?</li><li>16. Напишите блоховскую функцию и поясните ее суть.</li><li>17. Что такое функция плотности вероятности?</li></ol>
--	---

	<p>Приведите пример.</p> <p>18.Поясните термин “приближение сильной связи” с помощью рисунка.</p> <p>19.Поясните принцип заполнения орбиталей электронами.</p> <p>20.Поясните на рисунке модель <b>Кронига–Пенни</b>.</p> <p>21.Что можно получить из модели <b>Кронига–Пенни</b>?</p> <p>22.Нарисуйте закон дисперсии для электрона в модели <b>Кронига–Пенни</b>.</p> <p>23.Напишите граничные условия <b>Борна-Кармана</b>.</p>
<p>Знать: методы определения концентрации носителей заряда (в том числе графическое), подвижности носителей заряда в зависимости о температуры твердого тела;</p>	<p>1.Что такое “обменный интеграл”?</p> <p>2.В чем суть “приближения слабой связи”?</p>

### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий

### **КМ-3. Защита РГР (5 семестр)**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Расчетно-графическая работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент отвечает на заданные вопросы по материалу расчетного задания

### **Краткое содержание задания:**

Расчёт равновесных параметров полупроводника

**Контрольные вопросы/задания:**

Уметь: рассчитать концентрации носителей заряда, подвижности носителей заряда в зависимости от температуры и материала твердого тела;	1.Поясните, как рассчитать концентрацию неосновных носителей заряда при заданной температуре? 2.Поясните, как рассчитать значение подвижности носителей заряда при заданной температуре? 3.Поясните, как рассчитать концентрацию ионизованной примеси при заданной температуре?
---	---

**Описание шкалы оценивания:***Оценка: 5**Описание характеристики выполнения знания:* РГР выполнена без ошибок, на дополнительные вопросы получены развернутые ответы с пояснением*Оценка: 4**Описание характеристики выполнения знания:* РГР выполнена без ошибок, на дополнительные вопросы получены ответы с незначительными неточностями*Оценка: 3**Описание характеристики выполнения знания:* РГР выполнена после возврата от преподавателя, на дополнительные вопросы получены ответы с незначительными неточностями*Оценка: 2**Описание характеристики выполнения знания:* РГР не выполнена или ответы на вопросы показали полное непонимание физики твердого тела**КМ-4. Защита лабораторной работы №1 «Расчёт зависимости концентрации носителей в полупроводнике и ширины запрещённой зоны полупроводника при помощи эффекта Холла»****Формы реализации:** Устная форма**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями**Краткое содержание задания:**

Ответы на вопросы преподавателя

**Контрольные вопросы/задания:**

Уметь: пояснить принцип формирования зонной структуры твердого тела на примере кремния и германия;	1.Поясните принцип измерения эффекта Холла. 2.Приведите зависимость концентрации примесного и собственного полупроводника от температуры. Каким образом, используя данные зависимости, рассчитать ширину запрещённой зоны? 3.Постройте зависимость собственной и примесной концентрации от температуры для кремния и германия.
--	--

**Описание шкалы оценивания:***Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины

*Оценка:* 4

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки

### **КМ-5. Защита лабораторной работы №2 «Измерение чувствительности датчика Холла»**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями

**Краткое содержание задания:**

Ответы на вопросы преподавателя

**Контрольные вопросы/задания:**

Уметь: пояснить принцип формирования зонной структуры твердого тела на примере кремния и германия;	1.Как измерить время жизни носителей заряда? 2.Какова точность измерения времени жизни носителей заряда? 3.Можно ли измерить времени жизни конкретного носителя заряда? 4.Поясните принципиальную схему измерения.
--	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* 5

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины

*Оценка:* 4

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины

*Оценка:* 3

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка:* 2

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки

**КМ-6. Защита лабораторной работы №3 «Расчёт уровня легирования полупроводника при помощи измерения вольт-фарадных характеристик p-n-перехода»**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями

**Краткое содержание задания:**

Ответы на вопросы преподавателя

**Контрольные вопросы/задания:**

Уметь: рассчитать концентрации носителей заряда, подвижности носителей заряда в зависимости от температуры и материала твердого тела;	1.Поясните принципиальную структуру установки для измерения вольт-фарадных характеристик 2.Поясните точность измерения уровня легирования полупроводника 3.В чем заключаются источники погрешности при расчете уровня легирования полупроводника?
---	---

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки

**КМ-7. Защита лабораторной работы №4 «Измерение электропроводности кремниевой пластины четырёхзондовым методом»**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 15

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями

### Краткое содержание задания:

Ответы на вопросы преподавателя

### Контрольные вопросы/задания:

Уметь: рассчитать концентрации носителей заряда, подвижности носителей заряда в зависимости от температуры и материала твердого тела;	<ol style="list-style-type: none"><li>1. В ходе лабораторной работы продемонстрируйте, каким образом можно многократно снизить систематическую погрешность измерения электропроводности, связанную с инжекцией носителей заряда.</li><li>2. В ходе лабораторной работы продемонстрируйте, каким образом можно многократно снизить систематическую погрешность измерения электропроводности, связанную с сопротивлением контакта металлический зонд - полупроводник.</li><li>3. В ходе лабораторной работы продемонстрируйте, каким образом можно многократно снизить систематическую погрешность измерения электропроводности, связанную с термо - ЭДС.</li><li>4. В ходе лабораторной работы продемонстрируйте, каким образом при измерениях электропроводности пластины четырёхзондовым методом можно определить тип проводимости полупроводника.</li><li>5. Поясните назначение элементов измерительной установки. По какой причине измерения полупроводниковой пластины проводят, накрывая образец непрозрачным колпаком?</li></ol>
---	---

### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий.

## 6 семестр

### КМ-8. Защита лабораторной работы №5 «Изучение процессов рекомбинации и диффузии неосновных носителей заряда»

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями

#### Краткое содержание задания:

Ответы на вопросы преподавателя

#### Контрольные вопросы/задания:

Знать: механизмы диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда;	1.Поясните с помощью рисунка процесс диффузии неосновных носителей заряда.
Знать: основные механизмы процессов генерация и рекомбинация электронов и дырок;	1.Какие существуют виды рекомбинации? 2.Поясните термин “излучательная рекомбинация”. 3.Что такое рекомбинация Шокли-Рида-Холла? 4.Что такое поверхностная рекомбинация?
Уметь: рассчитать диффузионные и дрейфовые токи неравновесных носителей заряда;	1.Поясните принцип методики измерения. 2.Провести анализ физических причин, приводящих к погрешности в измерении

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий

**КМ-9. Защита лабораторной работы №6 «Измерение контактной разности потенциалов на контакте металл-полупроводник»**

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями

**Краткое содержание задания:**

Ответы на вопросы преподавателя

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: контактные, поверхностные и термоэлектрические явления в полупроводниках;	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Что такое термодинамическая работа выхода?</li><li>2.Как зависит термодинамическая работа выхода от типа полупроводника, уровня легирования, температуры?</li><li>3.Построить энергетические диаграммы контакта металл – полупроводник при различных соотношениях термодинамических работ выхода и полупроводников разного типа проводимости. Слои обогащения и обеднения в полупроводнике.</li><li>4.Какой контакт металл – полупроводник является выпрямляющим? Объяснить принцип выпрямления.</li></ol>
Уметь: изобразить энергетические диаграммы контактов твердых материалов (металлов, полупроводников в различных комбинациях, в том числе гетеропереходов);	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Поясните методику измерения контактной разности потенциалов</li><li>2.Провести анализ физических причин, приводящих к погрешности в измерении контактной разности потенциалов.</li><li>3.В каких координатах удобно представлять полученные зависимости и почему?</li></ol>

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий.

## КМ-10. Защита лабораторной работы №7 «Исследование спектральной зависимости стационарной фотопроводимости»

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Обучающийся отвечает на вопросы, сопровождая ответ рисунками и пояснениями

**Краткое содержание задания:**

Ответы на вопросы преподавателя

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: основные оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках;	1.Что такое фотопроводимость? 2.Изменение каких параметров полупроводника определяет величину фотопроводимости?
Уметь: объяснить основные оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках по спектральным характеристикам.	1.Как измерить величину фотопроводимости? 2.Какие параметры определяют величину фотопроводимости: а) параметры излучения; б) характеристические параметры полупроводника. 3.Поясните реализуемую в данной работе схему измерения фотопроводимости 4.Провести анализ физических причин, приводящих к погрешности в измерении фотопроводимости

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценка «неудовлетворительно» (2) выставляется студенту, обнаружившему серьезные пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий

## КМ-11. Защита РГР (6 семестр)

**Формы реализации:** Устная форма

**Тип контрольного мероприятия:** Расчетно-графическая работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 40

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Студент отвечает на заданные вопросы по материалу расчетного задания

**Краткое содержание задания:**

Расчёт неравновесных параметров полупроводника

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: основные механизмы процессов генерация и рекомбинация электронов и дырок;	1.Какие методы выведения из равновесия полупроводника Вы знаете?
Знать: основные оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках;	1.Поясните термины: собственное поглощение (прямые и непрямые переходы) 2.Как должна выглядеть теоретическая спектральная характеристика полупроводника? Ответ поясните.
Уметь: объяснить основные оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках по спектральным характеристикам.	1.Как строится спектральная характеристика полупроводника? 2.Поясните, как Вы рассчитывали концентрацию неравновесных носителей заряда в полупроводнике? 3.Поясните, как меняется спектральная характеристика при увеличении ширины запрещенной зоны полупроводника? 4.Поясните, как меняется спектральная характеристика при увеличении степени легирования полупроводника?

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* РГР выполнена без ошибок, на дополнительные вопросы получены развернутые ответы с пояснением

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* РГР выполнена без ошибок, на дополнительные вопросы получены ответы с незначительными неточностями

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* РГР выполнена после возврата от преподавателя, на дополнительные вопросы получены ответы с незначительными неточностями

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* РГР не выполнена или ответы на вопросы показали полное непонимание физики твердого тела

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

5 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

	<b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1</b> Кафедра ЭиН	Утверждаю: Зам. зав. кафедрой
<b>НИУ МЭИ</b>	Дисциплина: <i>Физика твердого тела</i>	
	Институт радиотехники и электроники	«18» 12 2020 г.
1. Уравнение Шредингера. Волновая функция и ее свойства. Волновой вектор. Волновая функция для свободной частицы. Закон дисперсии для свободной частицы. Квантование энергии атома в потенциальной яме. Квантовые числа.		
2. Положение уровня Ферми и концентрация электронов в донорном полупроводнике в невырожденном случае в зависимости от температуры. Определение концентрации ННЗ.		
3. Задача		

## Процедура проведения

Студент получает билет для самостоятельной подготовки. Подготовка для устного экзамена - 60 минут. По окончании подготовки студент отвечает экзаменатору.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ПК-2</sub> Демонстрирует знание принципов работы, физических и математических моделей основных полупроводниковых приборов

### **Вопросы, задания**

1. Уравнение Шредингера. Волновая функция и ее свойства. Волновой вектор. Волновая функция для свободной частицы. Закон дисперсии для свободной частицы. Квантование энергии атома в потенциальной яме. Квантовые числа.
2. Теория электропроводности на основе кинетического уравнения Больцмана. Равновесная и неравновесная функции распределения. Время релаксации.
3. Температурная зависимость удельной проводимости.
4. Закон Гука. Тензоры напряжений и деформаций. Распространение акустических волн в кристаллах.
5. Эффект Холла. Слабые магнитные поля. Монополярный случай. Коэффициент или постоянная Холла. Определение концентрации носителей заряда. Холловская подвижность.
6. Эффект Холла. Слабые магнитные поля. Биполярная проводимость. Угол Холла. Коэффициент или постоянная Холла. Матричный способ рассмотрения эффекта Холла. Влияние сильных магнитных полей.
7. Приближение сильной связи в трехмерных кристаллах. Распределение плотности вероятности обнаружения  $e$ -нов от расстояния. Энергия возмущения. Обменный интеграл. Энергетические зоны. Закон дисперсии для твердого тела. Фактор вырождения
8. Приближение слабой связи (почти свободных электронов). Модель Кронига-Пенни. Волновая функция. Прозрачность барьера. Закон дисперсии  $E(k)$ . Бегущие и стоячие волны. Схема приведенных зон.

9. Граничные условия Кармана-Борна. Квантование волновой функции и энергетических состояний. Число состояний в энергетической зоне.

10. Эффект магнитосопротивления. Физический и геометрический эффект.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Каков порядок Максвелловского времени релаксации в секундах?

Ответы:

- а) 10
- б) 10
- в) 10
- г) 10

Верный ответ: а

2. Каков порядок предельной концентрации электронов в кремнии в одном кубическом сантиметре

Ответы:

- а) 10
- б) 10
- в) 10
- г) 10

Верный ответ: а

3. Какой знак заряда квазичастицы дырки?

Ответы:

- а) Положительный
- б) Отрицательный
- в) Нейтральный
- г) Удвоенный отрицательный

Верный ответ: а

4. Для какого из приведенных полупроводников характерно наличие узкой долины в зоне проводимости с малой эффективной массой электронов, для которой возможен прямой переход из валентной зоны, и двух дополнительных долин с малой эффективной массой и непрямым переходом.

Ответы:

- а) GaAs
- б) Si
- в) Ge
- г) C

Верный ответ: а

5. Для какого из приведённых полупроводников характерна собственная проводимость уже при комнатной температуре?

Ответы:

- а) InSb
- б) Si
- в) Ge
- г) GaAs

Верный ответ: а

6. Какой из приведённых полупроводников достигнет вырождения при меньшей температуре?

Ответы:

- а) InSb
- б) Si
- в) Ge
- г) GaAs

Верный ответ: а

7. Какой из приведённых полупроводников обладает наименьшим значением длины волны красной границы фотоэффекта?

Ответы:

- а) GaAs
- б) Si
- в) Ge
- г) InSb

Верный ответ: а

8. Какой из приведённых полупроводников обладает самой большой подвижностью электронов?

Ответы:

- а) GaAs (в гамма - долине)
- б) Si
- в) Ge
- г) C

Верный ответ: а

9. Какой из приведённых полупроводников обладает самой большой шириной запрещённой зоны?

Ответы:

- а) GaAs
- б) Si
- в) Ge
- г) InSb

Верный ответ: а

10. Какой из приведённых полупроводников является самым дорогим (при равных массах и степенях чистоты)?

Ответы:

- а) GaAs
- б) Si
- в) Ge
- г) C

Верный ответ: а

## **II. Описание шкалы оценивания**

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «отлично» выставляется студенту, проявившему творческие способности в понимании, изложении и использовании материалов изученной дисциплины, безупречно ответившему не только на вопросы билета, но и на дополнительные вопросы в рамках основной программы дисциплины экзамена, правильно выполнившему практическое задание

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе. Как правило, оценка «хорошо» выставляется студенту, показавшему систематический характер знаний по дисциплине, ответившему на все вопросы билета,

правильно выполнившему практическое задание, но допустившему при этом принципиальные ошибки

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «удовлетворительно» выставляется студентам, допустившим погрешность в ответе на теоретические вопросы и/или при выполнении практических заданий, но обладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя, либо неправильно выполнившему практическое задание, но по указанию экзаменатора выполнившим другие практические задания из того же раздела дисциплины;

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение или приступить к профессиональной деятельности по окончании вуза без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине, не ответившим на все вопросы билета и дополнительные вопросы, и неправильно выполнившему практическое задание. Неправильное выполнение только практического задания не является однозначной причиной для выставления оценки «неудовлетворительно». Оценка «неудовлетворительно» выставляется также, если студент: - после начала экзамена отказался его сдавать; - нарушил правила сдачи экзамена (списывал, подсказывал, обманом пытался получить более высокую оценку и т.д.)

### III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе (БАРС) для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих.

#### 6 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

#### Пример билета

	ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 16 Кафедра ЭиН	Утверждаю: Зам. зав. кафедрой
МЭИ	Дисциплина: <i>Физика твердого тела</i>	
	Институт радиотехники и электроники	«20» 05 2021 г.
1. Температурная зависимость времени жизни носителей заряда при рекомбинации через рекомбинационные ловушки. 2. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников: температуры, давления, магнитного поля. 3. Задача. Нарисовать энергетическую диаграмму для ТДР, прямого и обратного смещения.		
Лектор Мирошникова И.Н.		

## Процедура проведения

Студент получает билет для самостоятельной подготовки. Подготовка для устного экзамена - 60 минут. По окончании подготовки студент отвечает экзаменатору.

### ***1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины***

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ПК-2</sub> Демонстрирует знание принципов работы, физических и математических моделей основных полупроводниковых приборов

#### **Вопросы, задания**

1. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов. Внутренняя контактная разностью потенциалов. Внешняя контактная разность потенциалов.
2. Контакт металл-полупроводник. Выпрямление тока на контакте металл – полупроводник. Запирающие и антизапорные слои. Энергетические диаграммы. Область пространственного заряда. Барьерная емкость.
3. Прямое и обратное смещение перехода металл-п/п-к. Энергетические диаграммы. Ток насыщения в диодной теории выпрямления.
4. Диодная и диффузионная теории выпрямления. ВАХ диода Шоттки в диффузионной теории. Туннельный эффект в диодной теории. Сила изображения. Автоэлектронная эмиссия.
5. Контакт электронного и дырочного полупроводников. Область пространственного заряда. Толщина ОПЗ. Определение контактной разности потенциалов. Барьерная емкость. Выпрямление на *p-n*-переходе.
6. Распределения концентрации НЗ при смещении. Энергетические диаграммы *pn*-перехода. Вольтамперная характеристика *pn*-перехода. Теория тонкого *pn*-перехода.
7. Контакт вырожденных электронного и дырочного полупроводников. Туннельный диод. ВАХ и энергетические диаграммы.
8. Гетеропереходы. Изотипные и анизотипные гетеропереходы. Правило Андерсона. Контакт *pGe* и *nGaAs*. ВАХ гетеропереходов. Эффект односторонней инжекции. Эффект «сверхинжекции».
9. Туннельный эффект, эффект Зенера. Туннельный пробой. Температурная зависимость зенеровского пробоя.
10. Термоэлектрические явления Эффект Зеебека. Эффект Пельтье. Эффект Томсона.
11. Фотопроводимость. Релаксация фотопроводимости (случаи линейной и квадратичной рекомбинаций).
12. Внутренний фотоэффект. Собственная фотопроводимость Красная граница фотоэффекта. Примесная фотопроводимость.

### ***II. Описание шкалы оценивания***

*Оценка: 5*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «отлично» (5) заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание материалов изученной дисциплины, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «отлично» выставляется студенту, проявившему творческие способности в понимании, изложении и использовании материалов изученной дисциплины, безусловно ответившему не только на вопросы билета, но и на дополнительные вопросы в рамках основной программы дисциплины экзамена, правильно выполнившему практическое задание

*Оценка: 4*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «хорошо» (4) заслуживает студент, обнаруживший полное знание материала изученной дисциплины, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе. Как правило, оценка «хорошо» выставляется студенту, показавшему систематический характер знаний по дисциплине, ответившему на все вопросы билета, правильно выполнившему практическое задание, но допустившему при этом принципиальные ошибки

*Оценка: 3*

*Описание характеристики выполнения знания:* оценки «удовлетворительно» (3) заслуживает студент, обнаруживший знание материала изученной дисциплины в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «удовлетворительно» выставляется студентам, допустившим погрешность в ответе на теоретические вопросы и/или при выполнении практических заданий, но обладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя, либо неправильно выполнившему практическое задание, но по указанию экзаменатора выполнившим другие практические задания из того же раздела дисциплины;

*Оценка: 2*

*Описание характеристики выполнения знания:* пробелы в знаниях основного материала изученной дисциплины, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение или приступить к профессиональной деятельности по окончании вуза без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине, не ответившим на все вопросы билета и дополнительные вопросы, и неправильно выполнившему практическое задание. Неправильное выполнение только практического задания не является однозначной причиной для выставления оценки «неудовлетворительно». Оценка «неудовлетворительно» выставляется также, если студент: - после начала экзамена отказался его сдавать; - нарушил правила сдачи экзамена (списывал, подсказывал, обманом пытался получить более высокую оценку и т.д.)

### ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе (БАРС) для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих.