

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Полупроводниковая электроника

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

---

Направленность образовательной программы

Фундаментальная радиофизика

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.31 Полупроводниковая электроника относится к обязательной части образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;	ОПК-1.1: Обладает фундаментальными знаниями в области физики и радиофизики ОПК-1.2: Анализирует физические аспекты теории и возможности ее использования для решения научно-исследовательских задач ОПК-1.3: Решает научно-исследовательские задачи, в том числе в сфере педагогической деятельности	ОПК-1.1: Знать: основные устройства на базе диода, такие как выпрямители, стабилизаторы, варисторы, и такие понятия как теорема Блоха, модель Кронига-Пени, зонная структура кристаллов, разрешенные и запрещенные зоны. Уметь: различать схемы включения транзисторов. Владеть: навыком анализировать режимы работы биполярного транзистора.  ОПК-1.2: Знать: основные устройства на базе диода, такие как выпрямители, стабилизаторы, варисторы, и такие понятия как теорема Блоха, модель Кронига-Пени, зонная структура кристаллов, разрешенные и запрещенные зоны. Уметь: различать схемы включения транзисторов. Владеть: навыком анализировать режимы работы биполярного транзистора.  ОПК-1.3: Знать: основные устройства	Собеседование	Экзамен: Контрольные вопросы Задания Задачи

		<p>на базе диода, такие как выпрямители, стабилизаторы, варисторы, и такие понятия как теорема Блоха, модель Кронига-Пени, зонная структура кристаллов, разрешенные и запрещенные зоны.</p> <p>Уметь: различать схемы включения транзисторов.</p> <p>Владеть: навыком анализировать режимы работы биполярного транзистора.</p>		
<p>ОПК-2: Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;</p>	<p>ОПК-2.1: Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов</p> <p>ОПК-2.2: Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы</p> <p>ОПК-2.3: Применяет практические навыки радиофизических исследований и представления результатов</p>	<p>ОПК-2.1:</p> <p>Знать методики анализа и базовые характеристики современных устройств и систем квантовой электроники, включая новые типы лазерных излучателей</p> <p>Уметь применять аппарат квантовой радиофизики для анализа вопросов теоретической физики, электродинамики, электроники</p> <p>Владеть навыками использования математического аппарата квантовой радиофизики для решения задач в теоретической физике, электродинамике, электронике.</p> <p>ОПК-2.2:</p> <p>Знать методики анализа и базовые характеристики современных устройств и систем квантовой электроники, включая новые типы лазерных излучателей</p> <p>Уметь применять аппарат квантовой радиофизики для анализа вопросов теоретической физики, электродинамики, электроники</p> <p>Владеть навыками использования математического аппарата</p>	Собеседование	<p>Экзамен:</p> <p>Контрольные вопросы</p> <p>Задания</p> <p>Задачи</p>

		<p>квантовой радиофизики для решения задач в теоретической физике, электродинамике, электронике.</p> <p>ОПК-2.3: Знать методики анализа и базовые характеристики современных устройств и систем квантовой электроники, включая новые типы лазерных излучателей Уметь применять аппарат квантовой радиофизики для анализа вопросов теоретической физики, электродинамики, электроники Владеть навыками использования математического аппарата квантовой радиофизики для решения задач в теоретической физике, электродинамике, электронике.</p>		
--	--	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	22
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	12
- КСР	2
<b>самостоятельная работа</b>	<b>36</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b>
	<b>Экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Тема 1. Кристаллическая структура твердого тела	4	1	1	2	2
Тема 2. Колебания и волны в кристаллической решетке	4	1	1	2	2
Тема 3. Электроны в периодическом потенциале	3	1		1	2
Тема 4. Статистика носителей заряда	4	1	1	2	2
Тема 5. Квазиклассическое описание движения носителей заряда	5	2	1	3	2
Тема 6. Неравновесные явления в полупроводниках	5	2	1	3	2
Тема 7. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках	4	1	1	2	2
Тема 8. Теория p-n перехода	3	1		1	2
Тема 9. Устройства на базе диода	4	1	1	2	2
Тема 10. Биполярный транзистор	4	1	1	2	2
Тема 11. Работа биполярных транзисторов в схемах	3	1		1	2
Тема 12. Явления на резкой границе раздела материалов	4	1	1	2	2
Тема 13. Полевой транзистор с p-n переходом и барьером Шоттки	5	2	1	3	2
Тема 14. Полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник	4	1	1	2	2
Тема 15. Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник	3	1		1	2
Тема 16. Работа полевых транзисторов в схемах	4	1	1	2	2
Тема 17. Полупроводниковые приборы СВЧ диапазона	4	2		2	2
Тема 18. Оптоэлектронные приборы	3	1		1	2
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	22	12	36	36

### Содержание разделов и тем дисциплины

Практические занятия (семинарские занятия /лабораторные работы) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа, групповых консультаций

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены ниже

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:**

1. Кристаллические решетки. Элементарная ячейка. Симметрии. Решетки Браве.
2. Кристаллографические направления. Области Дирихле. Обратная решетка. Индексы Миллера. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна.
3. Рентгеноструктурный анализ кристаллов. Описание решетки кремния.
4. Колебания простой и сложной цепочки. Продольные и поперечные колебания. Решетка с одним атомом в ячейке. Решетка с несколькими атомами в ячейке.
5. Законы дисперсии для трехмерной решетки. Акустические и оптические фононы.
6. Теория теплоемкости Дюлонга-Пти.
7. Квантовый подход к описанию кристаллов. Статика Бозе-Эйнштейна. Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая.
8. Уравнение Шредингера для периодического потенциала. Теорема Блоха.
9. Модель Кронига-Пени. Зонная структура кристаллов: разрешенные и запрещенные зоны. Закон дисперсии.
10. Классификация: металлы, диэлектрики, полупроводники. Классификация: ковалентные и ионные кристаллы. Свободные носители заряда: электроны и дырки. Эффективные массы электронов и дырок. Граничные условия Борна-Кармана. Плотность состояний
11. Теория р-п перехода. Резкий и диффузный р-п переходы.
12. Распределение заряда, структура поля и потенциала в р-п переходе. Распределение концентрации основных и неосновных носителей. Переход в состояние равновесия.
13. Обедненный слой. Диод под внешним напряжением. Формула Шокли. Вольт-амперные характеристики. Барьерная емкость перехода и сопротивление базы.
14. Пробой р-п перехода. Устройства на базе диода. Выпрямители. Стабилизаторы.

15. Диоды с накоплением заряда.

16. Биполярный транзистор. Типы транзисторов. Теория работы биполярного транзистора, токи созданные основными и неосновными носителями.

17. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора. Модель Эберса-Молла. Параметры для описания биполярных транзисторов.

18. Работа биполярных транзисторов в схемах. Режимы работы биполярного транзистора. Схемы включения транзисторов. Базовые элементы логики. Высокочастотные свойства.

### **5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:**

1. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.

2. Время жизни неравновесных носителей. Диффузия свободных носителей заряда. Ток диффузии и ток дрейфа. Возникновение внутреннего поля в неоднородном полупроводнике. Соотношение Эйнштейна.

3. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Максвелловская релаксация в проводящей среде. Время жизни неосновных носителей заряда. Диффузионная длина.

4. Уравнение Шредингера для периодического потенциала. Теорема Блоха. Модель Кронига-Пени.

5. Зонная структура кристаллов: разрешенные и запрещенные зоны. Закон дисперсии.

6. Классификация: металлы, диэлектрики, полупроводники. Классификация: ковалентные и ионные кристаллы. Свободные носители заряда: электроны и дырки. Эффективные массы электронов и дырок. Граничные условия Борна-Кармана.

7. Плотность состояний. Функция Ферми и поверхность Ферми. Заселение состояний в металлах и диэлектриках. Электронная теплоемкость в металлах. Заселение состояний в полупроводниках. Уравнение электронейтральности.

8. Уровень Ферми и концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках. Область истощения примесей. Основные и неосновные носители заряда.

9. Явления на резкой границе раздела материалов. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омический контакт.

10. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Структура металл-окисел-полупроводник. Плотность поверхностных состояний.

11. Гетеропереход. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, принципы их работы, распределение потенциала и поля в приборах, расчет статических вольт-амперных характеристик, типы и основные параметры транзисторов, высокочастотные свойства.

12. Полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, принципы его работы, распределение потенциала и поля в приборе, расчет статических вольт-амперных характеристик, типы и основные параметры транзисторов, высокочастотные свойства.

13. Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник, принципы его работы, распределение потенциала и поля в приборе, расчет статических вольт-амперных характеристик, типы и основные параметры транзисторов, высокочастотные свойства.

14. Работа полевых транзисторов в схемах, основные способы включения транзисторов. Комплементарные схемы. Базовые элементы логики.

15. Фотодетекторы. Полупроводниковые лазеры. Солнечные батареи.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место	Минимально допустимый уровень знаний.	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, превышающем программу



	оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	грубые ошибки	Допущено много негрубых ошибок	программе подготовки . Допущено несколько негрубых ошибок	программе подготовки . Допущено несколько несущественных ошибок	программе подготовки и. Ошибок нет.	подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами .	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	<b>превосходно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».

	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»
--	-------	---

### **5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-1**

1. Особенности кристаллической структуры твердых тел и правила построения ячейки Вигнера-Зейтца.
2. Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок
3. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.
4. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.
5. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.
6. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии
7. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.
8. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.
9. Р-п переход в состоянии равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.
10. Распределение заряда, структура поля и потенциала в р-п переходе. Распределение концентрации основных и неосновных носителей.
11. Формула Шокли. Вольт-амперные характеристики диода на основе р-п перехода.
12. Барьерная емкость р-п перехода и сопротивление базы. Пробой р-п перехода.
13. Выпрямители. Стабилизаторы.
14. Варисторы. Варакторы. Диоды с накоплением заряда.

#### **5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

1. Биполярный транзистор. Типы транзисторов. Теория работы транзистора. Токи созданные основными и неосновными носителями.

2. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора. Модель Эберса-Молла. Параметры для описания биполярных транзисторов.
3. Режимы работы биполярного транзистора. Схемы включения транзисторов. Базовые элементы логики. Высокочастотные свойства.
4. Явления на резкой границе раздела материалов. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омический контакт.
5. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Структура металл-окисел-полупроводник. Плотность поверхностных состояний. Гетеропереход.
6. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки. Эффект поля. Распределение потенциала и поля в приборе.
7. Расчет статических вольт-амперных характеристик полевых транзисторов. Типы и основные параметры транзисторов. Высокочастотные свойства.
8. Полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник. Принцип работы транзистора. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольт-амперных характеристик. Типы и основные параметры транзисторов.
9. Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник. Принцип работы транзистора. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольт-амперных характеристик.
10. Работа полевых транзисторов в схемах. Основные способы включения транзисторов. Комплементарные схемы. Базовые элементы логики.
11. Туннельный диод. Лавинно-пролетный диод.
12. Генератор Ганна.
13. Фотодетекторы. Полупроводниковые лазеры. Солнечные батареи.

### **Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)**

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом

Оценка	Критерии оценивания
	хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Задание 1. Р-п переход в состояние равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.

Задание 2. Распределение заряда, структура поля и потенциала в р-п переходе. Распределение концентрации основных и неосновных носителей.

Задание 3. Формула Шокли. Вольт-амперные характеристики диода на основе р-п перехода.

Задание 4. Барьерная емкость р-п перехода и сопротивление базы. Пробой р-п перехода.

Задание 5. Выпрямители. Стабилизаторы.

Задание 6. Варисторы. Варакторы. Диоды с накоплением заряда.

Задание 7. Биполярный транзистор. Типы транзисторов. Теория работы транзистора. Токи созданные основными и неосновными носителями.

Задание 8. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора. Модель Эберса-Молла. Параметры для описания биполярных транзисторов.

Задание 9. Особенности кристаллической структуры твердых тел и правила построения ячейки Вигнера-Зейтца.

Задание 10. Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок

Задание 11. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.

Задание 12. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.

### **5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

Задание 1. Режимы работы биполярного транзистора. Схемы включения транзисторов. Базовые элементы логики. Высокочастотные свойства.

Задание 2. Явления на резкой границе раздела материалов. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омический контакт.

Задание 3. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Структура металл-окисел-полупроводник. Плотность поверхностных состояний. Гетеропереход.

Задание 4. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки. Эффект поля. Распределение потенциала и поля в приборе.

Задание 5. Расчет статических вольт-амперных характеристик полевых транзисторов. Типы и основные параметры транзисторов. Высокочастотные свойства.

Задание 6. Полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник. Принцип работы транзистора. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольт-амперных характеристик. Типы и основные параметры транзисторов.

Задание 7. Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник. Принцип работы транзистора. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольт-амперных характеристик.

Задание 8. Работа полевых транзисторов в схемах. Основные способы включения транзисторов. Комплементарные схемы. Базовые элементы логики.

Задание 9. Туннельный диод. Лавинно-пролетный диод.

Задание 10. Генератор Ганна.

Задание 11. Фотодетекторы. Полупроводниковые лазеры. Солнечные батареи.

Задание 12. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.

Задание 13. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии

Задание 14. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.

Задание 15. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.

## Задание 16. Каковы магнитные свойства твердых тел?

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3.5 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Задача 1. Вывести вольт-амперную и вольт-фарадную характеристики р-п перехода. Объяснить физическую природу обратного тока диода. С использованием зонной диаграммы и распределения концентрации электронов и дырок дать качественную интерпретацию наличию небольшого наклона на участке насыщения обратной ветви ВАХ для реальных р-п переходов.

Задача 2. Вывести вольт-амперную характеристику р-п перехода. По аналогии с р-п переходом объяснить процессы протекания тока в гетеропереходе. Объяснить причины возникновения униполярной инжекции в биполярном гетеропереходе. Оценить соотношение электронной и дырочной компоненты токов в биполярном гетеропереходе. В какой конструкции гетероперехода возможна биполярная инжекция?

Задача 3. Вывести вольт-амперную и вольт-фарадную характеристику диода Шоттки. Как будет трансформироваться вольт-фарадная характеристика и напряжение пробоя  $\text{Au-p--p+}$  диода Шоттки при уменьшении толщины  $\text{p-слоя}$ ? Ответы обосновать с помощью зонной диаграммы. Объяснить технологию изготовления барьерного и омического контактов (фотолитография, напыление, травление, «взрыв»)

Задача 4. Объяснить распределение концентрации электронов, наличие электрического поля и потенциального барьера на границе  $\text{p+-p}$  перехода. Используя условия равновесия в такой системе вывести соотношение Эйнштейна. Объяснить физический смысл теплового потенциала как коэффициента пропорциональности между подвижностью и коэффициентом диффузии.

Задача 5. Найти положение уровня Ферми и концентрацию электронов в собственном германии при температуре 600 К, если известно, что ширина запрещенной зоны при таких температурах меняется по закону  $E_g = (0.7 - 3.10 \cdot 4T(K)) \text{ эВ}$  ( $m_n = 0.02m_0$ ,  $m_p = 0.2m_0$ ). Как зависит уровень Ферми от температуры в примесном полупроводнике и получить (качественно) зависимость контактной разности потенциалов в  $\text{p-n}$  переходе от температуры.

Задача 6. Получив зависимость крутизны  $\text{ВАХ}$  полевого транзистора с затвором Шоттки и его коэффициента статического усиления от напряжения на затворе и уровня легирования канала, объяснить преимущество канала на основе двумерного электронного газа.

Задача 7. В однородный полубесконечный электронный полупроводник с поверхности  $x=0$  стационарно инжектируются дырки. Вдоль образца в направлении  $x$  приложено электрическое поле  $E$ . Определить на каком расстоянии от поверхности образца концентрация неравновесных дырок уменьшится в  $e$  раз. Коэффициент диффузии дырок  $D_p$ , подвижность  $\mu_p$  и время жизни  $\tau_p$ . Объяснить, чем отличаются характеристики ( $\text{ВАХ}$ ,  $\text{ВФХ}$  и т.д.) фоторезистора и фотодиода Шоттки.

### **5.3.6 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

Задача 1. Получить зависимость коэффициента усиления полевого транзистора с управляющим  $\text{p-n}$  переходом от концентрации примеси в канале и напряжения на затворе. Для конкретной выходной  $\text{ВАХ}$  транзистора построить нагрузочную прямую и графически (качественно) определить динамический диапазон амплитуды входного сигнала (в схеме с общим истоком) для которого реализуется режим линейного усиления.

Задача 2. Объяснить преимущества гетеробиполярного транзистора перед биполярным для чего численно оценить: 1) степень влияния униполярной инжекции на коэффициент переноса носителей через базу; 2) амплитуду встроенного поля в варизонной базе и связанного с ним увеличения скорости носителей заряда.

Задача 3. Вывести  $\text{ВАХ}$  ПТ с управляющим  $\text{p-n}$  переходом. Качественно, исходя из распределений концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля вдоль канала транзистора, объяснить причины возникновения участка насыщения на выходной  $\text{ВАХ}$  транзистора. Объяснить правила выбора сопротивления нагрузки и напряжения питания транзистора для получения максимальной мощности выходного сигнала.

Задача 4. Вывести  $\text{ВАХ}$  МДП транзистора с индуцированным каналом. Качественно, используя зонную диаграмму и распределение электрического поля в транзисторе, объяснить причины возникновения насыщения на выходной  $\text{ВАХ}$  транзистора. Вывести коэффициент статического усиления прибора и

объяснить почему для реализации максимального усиления транзистора необходимо использовать участок насыщения выходной ВАХ.

Задача 5. Вывести ВАХ биполярного транзистора. Объяснить причины наличия небольшого наклона на выходных ВАХ транзистора (эффект Эрли). Для ответа использовать зонную диаграмму, график распределения концентраций электронов и дырок от продольной координаты в структуре транзистора и эквивалентную схему. Объяснить технологию формирования биполярного транзистора с помощью ионного легирования.

Задача 6. На конкретном примере распределения электрического поля вдоль канала полевого транзистора с коротким затвором объяснить физический смысл уравнений релаксации энергии и импульса электронов в полупроводнике. Количественно оценить длину затвора GaAs полевого транзистора Шоттки при которой эффект всплеска скорости будет давать наибольший положительный эффект (считать времена релаксации энергии и импульса известными)?

Задача 7. Исходя из времени релаксации импульса (10-13 с), эффективной массы электронов ( $0.55m_0$  для GaAs и  $0.2 m_0$  для Si) и ширины запрещенной зоны (1.2 эВ в Si и 1.4 эВ в GaAs) оценить напряженность поля при котором возникает лавинный пробой в GaAs и Si.

Задача 8. Вывести соотношение для плотности состояний в полупроводниковом кристалле. Получить выражение для концентрации электронов в зоне проводимости исходя из плотности состояний и функции Ферми. Объяснить при каких условиях электронный газ является вырожденным.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно»,



Оценка	Критерии оценивания
	ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Гапонов Виктор Иванович. Электроника : учеб. пособие для вузов. Ч. 1. Физические основы / [ред. В. Б. Брагинский]. - М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. - 516 с. - 1.06., 24 экз.
2. Гапонов Виктор Иванович. Электроника : учеб. пособие для вузов. Ч. 2. Электровакуумные и полупроводниковые приборы / [ред. В. Б. Брагинский]. - М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. - 592 с. - 1.27., 27 экз.
3. Орешкин Павел Тимофеевич. Физика полупроводников и диэлектриков : [учеб. пособие для вузов по специальности "Полупроводники и диэлектрики"]. - М. : Высшая школа, 1977. - 448 с. : ил. - 0.94., 14 экз.
4. Степаненко Игорь Павлович. Основы микроэлектроники : [учеб. пособие для вузов по специальностям "Полупроводники и диэлектрики" и "Полупроводниковые и микроэлектрон. приборы"]. - М. : Советское радио, 1980. - 423 с. : ил. - 1.20., 15 экз.

Дополнительная литература:

1. Пикус Григорий Езекиелевич. Основы теории полупроводниковых приборов. - М. : Наука, 1965. - 448 с. : черт. - (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). - 1.23., 42 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Козлов Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук  
Жолудев Максим Сергеевич, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 года, протокол № 09/23.