

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Национальный исследовательский**  
**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
решением ученого совета ННГУ  
протокол от «02» декабря 2024 г.  
№ 10

**Рабочая программа дисциплины**  
**Физика полупроводников (кандидатский экзамен)**

Уровень высшего образования  
**Подготовка кадров высшей квалификации**

Научная специальность  
**1.3.11. Физика полупроводников**

Программа подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
**Физика полупроводников**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2025 год

## 1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физика полупроводников (кандидатский экзамен)» относится к числу *обязательных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 4 году обучения в 7 семестре.

**Цель дисциплины** – является формирование профессиональных знаний, умений и навыков в области охватывающей основные разделы физики полупроводников, а также основы технологии и принципы работы приборов на базе полупроводниковых материалов.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

### Знать:

- актуальные проблемы и современного состоянии полупроводниковой микро- и нанoeлектроники;
- физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния;
- физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе;

### Уметь:

- самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты;
- разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния;
- исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеро-наноструктур;

### Владеть:

- способностями анализа и оценки научной информации в области физики полупроводников.
- навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
- навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантоворазмерных гетеро-наноструктур.

## 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 36 часов, из которых 2 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем, 32 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 2**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Химическая связь и атомная структура полупроводников	2						2
2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров	2						2
3. Основы зонной теории полупроводников	2						2

4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках	2						2
5. Кинетические явления в полупроводниках	2						2
6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках	2						2
7. Контактные явления в полупроводниках	2						2
8. Свойства поверхности полупроводников	3						3
9. Оптические явления в полупроводниках	3						3
10. Фотоэлектрические явления	3						3
11. Некристаллические полупроводники	3						3
12. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки	3						3
13. Принципы действия полупроводниковых приборов	7	2			2		3
<b>Промежуточная аттестация: –</b>	экзамен						

<b>Итого</b>	<b>36</b>	<b>2</b>			<b>2</b>		<b>32</b>
--------------	-----------	----------	--	--	----------	--	-----------

**Таблица 3**

**Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля
1	Химическая связь и атомная структура полупроводников.	<p>Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь.</p> <p>Структуры важнейших полупроводников – элементов <math>A^{IV}</math>, <math>A^{VI}</math> и соединений типов <math>A^{III}B^V</math>, <math>A^{II}B^{VI}</math>, <math>A^{IV}B^{VI}</math>.</p> <p>Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование

		<p>Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках.</p> <p>Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.</p>		
2	<p>Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров.</p>	<p>Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.</p> <p>Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).</p> <p>Молекулярно-лучевая эпитаксия.</p> <p>Металлорганическая эпитаксия.</p> <p>Методы легирования полупроводников.</p> <p>Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование
3	<p>Основы зонной теории полупроводников.</p>	<p>Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова. Уравнения движения электронов и дырок во</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование

		<p>внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.</p>		
4	Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках.	<p>Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование
5	Кинетические явления в полупроводниках.	<p>Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование

		<p>Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.</p>		
6	Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках.	<p>Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование
7	Контактные явления в полупроводниках.	<p>Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование

		<p>вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.</p> <p>Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе.</p> <p>Гетеропереходы.</p> <p>Энергетические диаграммы гетеропереходов.</p> <p>Варизонные полупроводники.</p>		
8	Свойства поверхности полупроводников.	<p>Поверхностные состояния и поверхностные зоны.</p> <p>Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности.</p> <p>Поверхностная рекомбинация.</p> <p>Эффект поля.</p> <p>Таммовские уровни.</p> <p>Скорость поверхностной рекомбинации.</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование
9	Оптические явления в полупроводниках.	<p>Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига.</p> <p>Межзонные переходы.</p> <p>Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов.</p> <p>Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.</p> <p>Поглощение света на свободных носителях заряда.</p> <p>Поглощение света на колебаниях решетки.</p> <p>Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана – Ландсберга),</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование

		<p>рассеяние на акустических фонах (Бриллюэна – Мандельштама).</p> <p>Влияние примесей на оптические свойства.</p> <p>Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках.</p> <p>Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.</p> <p>Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поппельса.</p> <p>Эффект Бурштейна-Мосса.</p> <p>Эффекты Фарадея и Фойгта.</p>		
10	Фотоэлектрические явления.	<p>Примесная и собственная фотопроводимость.</p> <p>Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.</p> <p>Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты.</p> <p>Термостимулированная проводимость.</p> <p>Фоторазогрев носителей заряда.</p> <p>Фотоэлектромагнитный эффект.</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование
11	Некристаллические полупроводники.	<p>Аморфные и стеклообразные полупроводники.</p> <p>Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников.</p> <p>Идеальное стекло.</p> <p>Гидрированные аморфные полупроводники.</p> <p>Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование



		<p>полупроводников.  Плотность состояний.  Локализация электронных состояний. Щель подвижности.  Легирование некристаллических полупроводников.  Механизмы переноса носителей заряда.  Прыжковая проводимость.  Закон Мотта.  Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.  Нестационарные процессы.  Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.  Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников.  Метастабильные состояния.</p>		
12	Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.	<p>Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования.  Квантовые нити.  Квантовые точки.  Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.  Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное</p>	Самостоятельная работа	Консультация, собеседование

		<p>поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.</p>		
13	<p>Принципы действия полупроводниковых приборов.</p>	<p>Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью. Шумы в полупроводниковых приборах. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах.</p>	<p>Самостоятельная работа</p>	<p>Консультация, собеседование</p>

		Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (HEMT). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.		
--	--	---	--	--

#### 4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, подготовку к промежуточной аттестации.

Для прохождения промежуточной аттестации после завершения семестра проводится экзамен, включающий в себя приведенные ниже вопросы, включенные в экзаменационные билеты.

#### 5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

##### 5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

##### **Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме экзамена**

Оценка *отлично* – исчерпывающее владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, твердое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы.

Оценка *хорошо* – достаточно полные знания программного материала, правильное понимание сути вопросов, знание определений, умение формулировать тезисы и аргументы. Ответы последовательные и в целом правильные, хотя допускаются

неточности, поверхностное знакомство с отдельными теориями и фактами, достаточно формальное отношение к рекомендованным для подготовки материалам.

Оценка *удовлетворительно* – фрагментарные знания, расплывчатые представления о предмете. Ответ содержит как правильные утверждения, так и ошибки, возможно, грубые. Испытуемый плохо ориентируется в учебном материале, не может устранить неточности в своем ответе даже после наводящих вопросов.

Оценка *неудовлетворительно* – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

## **5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

### **Раздел 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников**

1. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь.
2. Структуры важнейших полупроводников – элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$ .
3. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Прimitивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.
4. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

### **Раздел 2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров**

1. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.
2. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).
3. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
4. Методы легирования полупроводников.
5. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

### **Раздел 3. Основы зонной теории полупроводников**

1. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
2. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
3. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.
4. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

#### **Раздел 4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках**

1. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.
2. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

#### **Раздел 5. Кинетические явления в полупроводниках**

1. Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.
2. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

#### **Раздел 6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках**

1. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
2. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
3. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

#### **Раздел 7. Контактные явления в полупроводниках**

1. Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
2. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$  перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в  $p$ - $n$  переходе.
3. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.
4. Варизонные полупроводники.

#### **Раздел 8. Свойства поверхности полупроводников**

1. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.
2. Эффект поля.
3. Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

#### **Раздел 9. Оптические явления в полупроводниках**

1. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига.
2. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и не прямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

3. Поглощение света на свободных носителях заряда.
4. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана – Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна – Мандельштама).
5. Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.
6. Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса.
7. Эффект Бурштейна-Мосса.
8. Эффекты Фарадея и Фойгта.

#### **Раздел 10. Фотоэлектрические явления**

1. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.
2. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.
3. Фоторазогрев носителей заряда.
4. Фотоэлектромагнитный эффект.

#### **Раздел 11. Некристаллические полупроводники**

1. Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.
2. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.
3. Легирование некристаллических полупроводников.
4. Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.
5. Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.
6. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.
7. Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

#### **Раздел 12. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки**

1. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.
2. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.
3. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

#### **Раздел 13. Принципы действия полупроводниковых приборов**

1. Вольтамперная характеристика  $p-n$  перехода. Приборы с использованием  $p-n$  переходов.
2. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

3. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник
4. (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.
5. Шумы в полупроводниковых приборах.
6. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.
7. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.
8. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (HEMT). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### **а) основная литература:**

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников.-М.: Энергия, 1976.-416 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135488202&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Shalimova.pdf](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Shalimova.pdf)  
[https://e.lanbook.com/book/648#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/648#book_name)
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела : Учеб.- 3-е изд., стер.- М: Высш. шк.- 2000.- 494 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135448392&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Pavlov-Khokhlov.djvu](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Pavlov-Khokhlov.djvu)  
[http://www.studmed.ru/pavlov-pv-hohlov-af-fizika-tverdogo-tela\\_0c8e3f3519f.html#](http://www.studmed.ru/pavlov-pv-hohlov-af-fizika-tverdogo-tela_0c8e3f3519f.html#)
3. Киреев П.С. Физика полупроводников.-М.: Высш. шк., 1975.-584 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135415500&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Kireev.pdf](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kireev.pdf)  
[http://www.studmed.ru/kireev-ps-fizika-poluprovodnikov\\_24cecbadf3e.html](http://www.studmed.ru/kireev-ps-fizika-poluprovodnikov_24cecbadf3e.html)
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников.-М.: Наука, 1990.- 688 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135377974&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu)  
<http://www.ph4s.ru/books/poluprov/BPP.rar>
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.-М.: Мир, 1984.-Т. 1.-456 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135407373&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Sze\\_2.djvu](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Sze_2.djvu)  
<http://www.ph4s.ru/books/poluprov/zi-fizikapolupr.rar>
6. Физика твёрдого тела: Лабораторный практикум. Учебное пособие. В 2 т. /Под ред. проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические свойства твёрдых тел. -М: Высш. шк., 2001.-484 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=42525>

### **б) дополнительная литература:**

1. Зеегер К. Физика полупроводников.-М.: Мир, 1977.- 616 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135407011&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Zeeger-Poluprovodniki.djvu](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Zeeger-Poluprovodniki.djvu)
2. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников.-М.: Высш. шк., 1984.-352 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135480171&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Fistul.pdf](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Fistul.pdf)

- <http://www.twirpx.com/file/2221479/>
3. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. -М.: Наука, 1978.-792 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135416119&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu)  
[http://www.studmed.ru/kittel-ch-vvedenie-v-fiziku-tverdogo-tela-v-2-h-tomah\\_9d52ded9eac.html](http://www.studmed.ru/kittel-ch-vvedenie-v-fiziku-tverdogo-tela-v-2-h-tomah_9d52ded9eac.html)
  4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М. Радио и связь. 1990.- 264 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135384725&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Vikulin-Stafeev.pdf](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Vikulin-Stafeev.pdf)  
<http://www.twirpx.com/file/996485/>
  5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М. ФМЛ. 1978.-616 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135367685&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Anselm-Poluprovodniki.djvu](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Anselm-Poluprovodniki.djvu)  
[https://e.lanbook.com/reader/book/71742/#book\\_name](https://e.lanbook.com/reader/book/71742/#book_name)
  6. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников /Пер. с англ. И.И. Решинной. Под ред. Б.П. Захарчени.- 3-е изд.- М.: Физматлит, 2002.- 560 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135413168&DB=1>  
[http://phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf)  
<http://www.ph4s.ru/books/poluprov/Kardona.rar>

**в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы**

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ  
<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»  
<http://phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ  
<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов  
<http://www.ph4s.ru> - Образовательный проект А.Н. Варгина  
<http://www.twirpx.com> - Общедоступный сайт [www.twirpx.com](http://www.twirpx.com)

**7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
  - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
  - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
  - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными



государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы:

Автор проф. Д.А. Павлов

Рецензент проф. Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н. профессор

\_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

**Программа одобрена** на заседании методической комиссии физического факультета от  
\_\_\_\_\_ 2022 года, протокол № б/н