

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ протокол  
№ 4 от «14» декабря 2021г.

**Рабочая программа дисциплины**

**Физика полупроводников**

---

Уровень высшего образования  
бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника  
Направленность (профиль): Материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижегород, 2022

## 1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ООП

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к дисциплинам обязательной части образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микро-системная техника. Для усвоения данного курса необходимы знания по таким модулям и дисциплинам в рамках образовательной программы бакалавра как модуль «Математика», курс «Квантовая механика» модуля «Теоретическая физика» и курс «Физика конденсированного состояния».

Освоение данной дисциплины обязательно и предполагается в 6-м семестре, поскольку оно необходимо как предшествующее для дисциплин профессионального цикла «Физика низкоразмерных систем», «Материалы и методы нанотехнологии», «Физические основы электроники», «Наноэлектроника», «Схемотехника», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Основы технологии электронной компонентной базы», а также дисциплин по выбору «Квантовая и оптическая электроника», «СВЧ-электроника», «Экспериментальные методы исследования», «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур» и др.

«Физика полупроводников» - естественнонаучная дисциплина, представляющая собой раздел физики твердого тела, в котором углубленно изучаются свойства полупроводников, определяющие их ведущую роль в современной электронике, а также важные для понимания физических процессов при проведении фундаментальных исследований полупроводниковых низкоразмерных систем.

**Цель изучения дисциплины** - сформировать фундамент знаний и навыков, необходимых для осознанного и целенаправленного использования свойств полупроводников при разработке и создании полупроводниковых приборов и элементов наноэлектроники.

**Задачами курса** являются: изучение взаимосвязи состава и структуры полупроводников и их физических свойств; обучение методам расчета и измерений параметров и характеристик полупроводников; создание основы для последующего изучения вопросов физики полупроводниковых приборов, включая элементы и приборы наноэлектроники, физики низкоразмерных систем, твердотельной электроники и технологии микро- и наноэлектроники.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции	Результаты обучения по дисциплине	
ОПК 1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1. Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы	<b>Знать:</b> – основы зонной теории твердых тел; – классификацию и особенности реальной зонной структуры элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений, параметры их зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования для конкретных практических приложений; – типы и роль примесей в полу-	Коллоквиум, контрольные вопросы, экзаменационные вопросы

		<p>проводниках, методы описания мелких и глубоких примесных состояний, методы расчета положения уровня Ферми в полупроводнике, особенности температурной зависимости концентрации носителей заряда, основные эффекты, проявляющиеся при высоком уровне легирования, природу и свойства поверхностных состояний;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– статистику равновесных и неравновесных электронов и дырок в полупроводниках.</li> <li>– теорию явлений переноса заряда.</li> <li>– оптические, электрические, гальваномагнитные, термоэлектрические свойства полупроводников.</li> </ul>	
	ОПК 1.2. Умеет применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	<p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– объяснять сущность физических явлений и процессов в полупроводниках и простейших полупроводниковых структурах;</li> <li>– производить анализ и делать количественные оценки параметров физических процессов;</li> <li>– экспериментально определять основные параметры полупроводника – ширину запрещенной зоны, концентрацию, подвижность, время жизни, коэффициент диффузии носителей заряда;</li> <li>– изучать оригинальные научные работы и обзоры в области физики полупроводников.</li> </ul>	
	ОПК 1.3. Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач	<p><b>Владеть:</b></p> <p>навыками применения полученных знаний для решения конкретных задач, возникающих как в научно-исследовательской работе, так и в производственно-технологическом процессе.</p>	
ОПК ОС-8. Способен применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать	ОПК ОС-8.1. Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью.	<p><b>Знать:</b></p> <p>фундаментальные основы нанотехнологии, физические свойства систем с пониженной размерностью на основе полупроводников.</p>	Коллоквиум, контрольные вопросы, экзаменационные вопросы
	ОПК ОС-8.2. Знает современные тен-	<p><b>Знать</b></p> <p>современные тенденции развития нано-</p>	

современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности.	денции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности.	технологий создания полупроводниковых квантоворазмерных наногетероструктур в своей профессиональной деятельности.	
	ОПК ОС-8.3. Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности	<b>Уметь</b> применять знания физики полупроводников в своей профессиональной деятельности.	

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1. Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	64
- контроль самостоятельной работы	2
самостоятельная работа	33 (работа в семестре) 45 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	6 семестр – экзамен

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единицы, всего 144 часа, из которых 66 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (64 часа лекции, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 78 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

#### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе				
		Контактная работа, часов				Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение	7	4			4	3

2. Основы зонной теории твердого тела	14	10			10	4
3. Статистика равновесных электронов и дырок	16	10			10	6
4. Статистика неравновесных электронов и дырок	16	10			10	6
5. Оптические свойства полупроводников	16	10			10	6
6. Люминесценция и стимулированное излучение	14	10			10	4
7. Явления переноса заряда в полупроводниках	14	10			10	4
<b>Промежуточная аттестация по дисциплине: экзамен – 2 часа</b>						

## Содержание разделов дисциплины

1. Введение. Цель и задачи курса. Основная и дополнительная литература. Общая характеристика проводников электричества. Фундаментальные свойства и природа электропроводности металлов, полупроводников и ионных проводников электричества. Классическая теория электронной проводимости. Модель Друде. Понятия дрейфа, времени релаксации и подвижности носителей тока. Закон Ома. Механизмы образования носителей тока. Электронная и дырочная проводимость. Примесная проводимость. Качественная интерпретация свойств с точки зрения зонной теории. Краткая характеристика важнейших классов полупроводников ( $A^4$ ,  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$ , органические, аморфные полупроводники).

2. Основы зонной теории твердого тела. Уравнение Шредингера для кристалла и основные приближения теории твёрдого тела (ТТ). Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Качественное сравнение энергетических спектров свободного электрона, электрона в атоме и в кристалле. Энергетический спектр ТТ на примере кремния. Волновая функция Электрона в кристалле.

Теорема Блоха и её следствия. Дисперсионное соотношение и его свойства. Зоны Бриллюэна.

Приближение эффективной массы. Электроны и дырки. Модель Кронига-Пенни. Структура энергетических зон полупроводников. Стандартная зонная структура и типичные отклонения от нее (непрямозонность, многодолинность, вырождение зон, несферичность изоэнергетических поверхностей). Зона Бриллюэна алмазоподобных полупроводников и особенности зонной структуры некоторых из них (Si, Ge,  $Si_xGe_{1-x}$ , GaAs, GaP,  $GaAs_{1-x}P_x$ , InSb). Период решётки и ширина запрещённой зоны основных полупроводников, и инжиниринг прямозонных твёрдых растворов на их основе. Водородоподобная модель примесных центров и энергетических уровней в кристалле. Локализованные состояния на поверхности кристалла. Уровни Тамма.

3. Статистика равновесных электронов и дырок. Общая характеристика равновесного состояния. Принцип детального равновесия. Модель полупроводника. Функция плотности состояний и функция распределения электронов и дырок. Масса плотности состояний. Уровень Ферми. Распределение электронов и дырок по энергии. Зависимость концентрации электронов и дырок от уровня Ферми. Невырожденные полупроводники. Условие электрической

нейтральности. Температурная зависимость концентрации носителей и уровня Ферми (собственный полупроводник, некомпенсированный и компенсированный примесный полупроводник). Температурная зависимость ширины запрещённой зоны. Условие равновесия электронов и дырок. Понятие основных и неосновных носителей тока. Сильно легированные полупроводники. Уменьшение энергии ионизации при сильном легировании. Прыжковая примесная проводимость. Вырождение электронного газа. Свойства вырожденного и невырожденного газа.

4. Статистика неравновесных электронов и дырок. Неравновесное состояние. Принцип детального равновесия. Генерация, термализация и рекомбинация неравновесных носителей. Стационарные концентрации неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми. Время жизни. Уравнение непрерывности. Механизмы рекомбинации. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры для основных механизмов рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная безизлучательная рекомбинация. Рекомбинация через ловушки (Теория Шокли - Рида - Холла). Случай нескольких типов ловушек. Центры прилипания и их влияние на кинетику неравновесных процессов.

5. Оптические свойства полупроводников. Оптические параметры и связь между ними. Коэффициент поглощения. Дифференциальный и интегральный закон поглощения. Механизмы поглощения света. Собственное поглощение. Прямые и непрямые оптические переходы. Спектральная зависимость коэффициента поглощения и зонная структура полупроводников. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Бурштейна-Мосса. Экситоны и экситонное поглощение. Примесное поглощение. Поглощение излучения свободными носителями.

6. Люминесценция и стимулированное излучение. Виды люминесценции. Фотолюминесценция (ФЛ). Межзонная, экситонная, примесная и внутрицентровая ФЛ. Общие закономерности кинетики и температурной зависимости ФЛ. Люминофоры и их применение.

Стимулированное излучение. Принцип действия твердотельных лазеров, их основные характеристики и технические применения. Инверсная населенность уровней и усиление излучения. 3-х и 4-х уровневые системы. Резонатор Фабри-Перо. Спектр излучения лазера. Угловая расходимость пучка. Мощность излучения. Рубиновый лазер. Лазер с модулированной добротностью. Лазерные материалы. Применение твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры.

7. Явления переноса заряда в полупроводниках. Общая теория явлений переноса заряда. Выражение для плотности тока. Кинетическое уравнение Больцмана и его решение для полупроводника, находящегося в электрическом, магнитном и температурном поле. Кинетические коэффициенты. Интеграл столкновений. Механизмы рассеяния носителей в ТТ. Тепловое или решеточное рассеяние. Рассеяние на акустических и оптических колебаниях (фононах) решетки. Пьезоэлектрическое рассеяние. Примесное рассеяние на нейтральной и ионизированной примеси. Время релаксации импульса и его зависимость от скорости для основных механизмов рассеяния. Электропроводность полупроводников. Вычисление кинетического коэффициента, определяющего электропроводность. Дрейфовая подвижность носителей тока и ее зависимость от уровня легирования и температуры. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.

#### 4. Образовательные технологии

Основные виды образовательных технологий: лекции, самостоятельная работа и промежуточная аттестация в форме экзамена.

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

*Виды самостоятельной работы.* Самостоятельная работа предусмотрена при освоении лекционного материала всех разделов дисциплины. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах с доступом к базам данных и к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости сводится к контролю самостоятельной работы (КСР) и осуществляется путём коллоквиумов, контрольные вопросы которых не выкладываются на общий доступ.

Для прохождения промежуточной аттестации по данному предмету проводится экзамен, включающий в себя билеты с двумя контрольными вопросами.

*Контрольные (экзаменационные) вопросы для проведения промежуточной аттестации (экзамена) по итогам освоения дисциплины:*

1. Общая характеристика (классификация) проводников электричества. Классическая теория электронной проводимости. Закон Ома. Механизмы образования носителей тока. Примесная и дырочная проводимость.
2. Основные химические классы полупроводников. Элементарные полупроводники. Полупроводники типа  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$ ,  $A^4B^6$ . Органические полупроводники.
3. Основы зонной теории твёрдого тела. Уравнение Шредингера. Свободная частица. Атом водорода. Уравнение Шредингера для кристалла. Основные приближения зонной теории твёрдого тела. Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Энергетический спектр свободного электрона, атома и кристалла.
4. Волновая функция электрона в периодическом поле. Теорема Блоха. Следствия теоремы Блоха. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна в кубических кристаллах.
5. Приближение эффективной массы. Электроны и дырки в кристалле. Зонная модель твёрдых тел (металлы, полупроводники и диэлектрики). Заполнение зон.
6. Модель Кронига-Пенни.
7. Структура энергетических зон полупроводников. Понятие простой зонной структуры. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Зонная структура кремния, германия, арсенида галлия, антимонида индия и сложных алмазоподобных полупроводников ( $GaAs_{1-x}P_x$  и т.п.).
8. Водородоподобная модель примесных центров и энергетических уровней в кристалле. Локализованные состояния на поверхности кристалла.
9. Статистика равновесных электронов и дырок в полупроводнике. Общая характеристика равновесного состояния. Принцип детального равновесия. Модель полупроводника.
10. Функция плотности состояний  $g(E)$  и масса плотности состояний для стандартной и нестандартных зонных структур. Плотность состояний на дискретных примесных центрах.
11. Функция распределения. Определение уровня Ферми. Распределение электронов и дырок по энергии в энергетических зонах. Концентрации электронов и дырок в зонах и на при-

месных уровнях как функции уровня Ферми. Условие электрической нейтральности полупроводника.

12. Собственный полупроводник. Зависимость концентрации, уровня Ферми и ширины запрещённой зоны от температуры.
13. Условие равновесия электронов и дырок в невырожденном полупроводнике. Некомпенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
14. Компенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
15. Сильно легированные полупроводники. Вырождение электронного (дырочного) газа и его свойства.
16. Статистика неравновесных электронов и дырок. Время жизни носителей тока. Стационарные концентрации неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми.
17. Уравнение непрерывности. Классификация механизмов рекомбинации.
18. Межзонная излучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
19. Межзонная безызлучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
20. Рекомбинация через ловушки. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
21. Рекомбинация при наличии нескольких типов ловушек. Центры прилипания в полупроводниках и их влияние на кинетику неравновесных процессов в полупроводниках.
22. Оптические свойства твердых тел. Оптические коэффициенты. Механизмы поглощения света в полупроводниках. Собственное (фундаментальное или межзонное) поглощение. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Бурштейна-Мосса. Экситоны и экситонное поглощение. Примесное поглощение излучения. Поглощение излучения свободными носителями.
23. Люминесценция полупроводников. Внутрицентровая (примесная) фотолюминесценция. Рекомбинационная фотолюминесценция в полупроводниках. Экситонная люминесценция. Межзонная фотолюминесценция. Примесная фотолюминесценция. Примесная фотолюминесценция на донорно-акцепторных парах. Кинетика фотолюминесценции. Температурная зависимость фотолюминесценции.
24. Стимулированное излучение. Твердотельные лазеры. 3-х и 4-х уровневые системы. Спектр излучения лазера. Угловая расходимость пучка. Мощность излучения. Рубиновый лазер. Лазер с модулированной добротностью. Лазерные материалы. Применение твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры.
25. Явления переноса заряда в полупроводниках. Общая теория явлений переноса заряда. Общее выражение для плотности тока. Кинетическое уравнение Больцмана и его решение.
26. Рассеяние носителей тока. Время релаксации импульса. Механизмы рассеяния. Рассеяние на акустических и оптических фононах. Пьезоэлектрическое рассеяние. Рассеяние на ионизированной и нейтральной примеси.



27. Электропроводность полупроводников и связанные с ней явления. Дрейфовая подвижность. Рассеяние на акустических фононах, на ионизованной и на нейтральной примеси.
28. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.

*Дополнительные экзаменационные вопросы:*

1. Дайте определение подвижности носителей заряда. В каких единицах она измеряется?
2. Запишите закон Ома в дифференциальной форме. Как связана проводимость с концентрацией и подвижностью носителей заряда. В каких единицах она измеряется?
3. Нарисуйте зависимость  $n(T)$ ,  $\mu(T)$  и  $\sigma(T)$  в координатах Аррениуса.
4. Назовите известные Вам структурные типы. Какой структурный тип у полупроводников Si, Ge, GaAs?
5. Запишите уравнение Шредингера в самом общем виде (временное и стационарное).
6. Запишите выражение для энергетического спектра состояний электрона в атоме водорода.
7. Запишите выражение для волновой функции Блоха.
8. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в одноэлектронном приближении.
9. Дайте определение понятия «зоны Бриллюэна».
10. Какой многогранник описывает зону Бриллюэна в кубических кристаллах (примитивная ячейка, ОЦК, ГЦК)?
11. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в приближении эффективной массы. Каков ее смысл?
12. Раскройте понятие стандартной (простой) зонной структуры.
13. Перечислите отклонения реальной зонной структуры от простой (стандартной).
14. Чему равна ширина запрещенной зоны основных полупроводников (Si, Ge, GaAs)?
15. Нарисуйте (качественно) зонную структуру Si, Ge, GaAs.
16. Нарисуйте общую модель полупроводника, используемую в статистике равновесных электронной и дырок.
17. Что такое функция плотности состояний? В каких единицах она измеряется?
18. Что такое функция распределения? В каких единицах она измеряется?
19. Запишите выражение для  $g_c(E)$  и  $g_v(E)$ .
20. Запишите выражение функции Ферми-Дирака.
21. Запишите уравнение электронейтральности полупроводника в самом общем виде.
22. Нарисуйте ход температурной зависимости положения уровня Ферми в полупроводнике  $n$  – типа (некомпенсированном).
23. Напишите выражение для концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике (в зависимости от температуры).
24. Как по наклону зависимости  $\lg n_i = f(10^3/T)$  определить  $\Delta E_g$ ?
25. Как ширина запрещенной зоны зависит от температуры?
26. Постройте зависимость  $\lg n = f(10^3/T)$  для некомпенсированного полупроводника  $n$  – типа. Что по ней можно определить?
27. Что такое некомпенсированный полупроводник?

28. Что такое вырожденный полупроводник? Критерий вырождения.
29. Дайте определение времени жизни.
30. Запишите уравнение непрерывности для электронов и дырок.
31. Поясните термины: межзонная излучательная рекомбинация, межзонная безызлучательная рекомбинация, рекомбинация через ловушки.
32. Чем отличаются центры рекомбинации от центров прилипания?
33. Что такое оптические коэффициенты (интегральные)?
34. Запишите закон Бюргера – Ламберта в дифференциальной форме.
35. Каков смысл дифференциального коэффициента поглощения  $\alpha$ ? В каких единицах он измеряется?
36. Связь красной границы собственного поглощения с шириной запрещенной зоны в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
37. Перечислите механизмы оптического поглощения в полупроводниках.
38. В чем суть эффекта Франца – Келдыша?
39. В чем суть эффекта Бурштейна – Мосса?
40. Назовите основные механизмы фотолюминесценции.
41. Как создать условия для возникновения стимулированного излучения в твердом теле?
42. Чем многомодовый лазер отличается от одномодового?
43. Принцип работы лазера с модулированной добротностью.
44. Принцип работы инжекционного лазера.
45. Перечислите основные механизмы рассеяния носителей в полупроводнике.

#### **Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине**

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	Неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено		зачтено				

<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала.  Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу 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 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 владения материалом. 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 некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми 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

## 6.2. Описание шкал оценивания

При выставлении **экзаменационной** оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибалльная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе бакалавра) трансформируется в пятибалльную. Обе шкалы привязаны к 100-балльной системе, в которой баллы набираются путем ответа на основные и дополнительные экзаменационные вопросы. Экзаменационный билет содержит два основных вопроса. За ответ на каждый из вопросов начисляется максимум 50 баллов. Итого можно набрать максимум 100 баллов. Комплект до-

полнительных экзаменационных вопросов может быть использован для уточнения оценки в пределах  $\pm 10$  баллов.

### Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Баллы	Семибальная шкала	Описание семибальной шкалы	Пятибальная шкала
90-100	5,5 Превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.	5 отлично
80-89	5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
75-79	4,5 очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
70-74	4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
60-69	3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетворительно
40-59	2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлетворительно
<40	1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

### 6.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Оценочные средства коллоквиумов для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература:

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников.-М.: Энергия, 1976.-416 с.  
<https://e.lanbook.com/book/167840>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Shalimova.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Shalimova.pdf)
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела: Учеб.- 3-е изд., стер.- М: Высш. шк.- 2000.- 494 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=44686&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Pavlov-Khokhlov.djvu](http://spen.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://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397920&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Kireev.pdf](http://spen.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://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=445646&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu)
  5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.-М.: Мир, 1984.-Т. 1.-456 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=324623&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Size\\_2.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Size_2.djvu)

**б) дополнительная литература:**

1. Зеегер К. Физика полупроводников.-М.: Мир, 1977.- 616 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=85771&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Zeeger-Poluprovodniki.djvu](http://spen.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://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397943&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Fistul.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Fistul.pdf)
3. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела.-М.: Наука, 1978.-792 с.  
[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)  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu)
4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М. Радио и связь.1990.- 264 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=454236&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Vikulin-Stafeev.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Vikulin-Stafeev.pdf)
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М. ФМЛ. 1978.-616 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397901&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Anselm-Poluprovodniki.djvu](http://spen.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. Решиной. Под ред. Б.П. Захарчени.- 3-е изд.- М.: Физматлит, 2002.- 560 с.  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf)

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

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ

<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»

<http://spen.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

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор: проф. Д.А. Павлов

Рецензент:

заведующий кафедрой  
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой  
физики полупроводников, электроники и наноэлектроники,  
д.ф.-м.н., профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «14» декабря 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ

А.А. Перов