

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  
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО  
решением президиума  
ученого совета ННГУ  
протокол от  
«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины

**Физика твердого тела**

---

*(наименование дисциплины (модуля))*

Уровень высшего образования

магистратура

---

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.03 радиофизика

---

*(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)*

Направленность образовательной программы

Физическая электроника

---

*(указывается профиль / магистерская программа / специализация)*

Форма обучения

очная

---

*(очная / очно-заочная / заочная)*

Нижний Новгород

2023 год

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
1	Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина «Физика твердого тела» Б1.В.ДВ.06.01 относится к части ООП направления подготовки 03.04.03 «Радиофизика», формируемой участниками образовательных отношений.

## 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**	
ПК-1 Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области микро- и, наноэлектроники, мощной электроники при решении задач своей профессиональной деятельности	ПК-1.1. Знает принципы сбора и анализа информации, методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач. ПК-1.2. Умеет работать с большим объемом данных, систематизировать и анализировать информацию, полученную из различных источников. ПК-1.3. Владеет современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и	<i>Знать</i> такие понятия, как теорема Блоха, модель Кронига-Пени, зонная структура кристаллов, разрешенные и запрещенные зоны. <i>Уметь</i> решать уравнение Шредингера для различных зависимостей потенциала. <i>Владеть</i> навыком классификации кристаллов.	<i>зачет</i>

	эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.		
ПК-2 Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники и оформлять их результаты	<p>ПК-2.1. Знает современное состояние исследований в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов.</p> <p>ПК-2.2. Умеет выбирать и применять аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p> <p>ПК-2.3. Владеет навыками планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций по отдельным разделам тем в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники.</p>	<p>Знать такие понятия, как уровень Ферми, концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках, область истощения примесей, основные и неосновные носители заряда, электронная теплоемкость в металлах.</p> <p>Уметь оценить возможность управления проводимостью с помощью легирования в различных полупроводниковых материалах.</p> <p>Владеть навыком оценки заселения состояний в металлах, диэлектриках и полупроводниках.</p>	зачет
ПК-3 Способен разрабатывать и подготавливать составные части документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов научно-	<p>ПК-3.1. Знает нормативные документы для составления заявок, грантов, проектов НИР, требования к содержанию и правила оформления рукописей к публикации в рецензируемых</p>	<p>Знать основные методы написания протоколов и отчетов по измерениям</p> <p>Уметь оформлять рукописи, протоколы, отчеты</p> <p>Владеть навыками оформления протоколов и отчетов</p>	зачет

исследовательских и опытно- конструкторских разработок	научных изданиях. ПК-3.2. Умеет представлять результаты НИР академическому и бизнес-сообществу. ПК-3.3. Владеет навыками составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно- исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика.		
---	---	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная форма обучения</b>
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>3 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b> <b>- занятия лекционного типа</b>	<b>33</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>75</b>
<b>КСР</b>	<b>1</b>
<b>Промежуточная аттестация – экзамен/зачет</b>	<b>Зачет</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

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

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме лекционных занятий.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)			В том числе														Самостоятельная работа обучающегося, часы		
				Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы																
				из них																
	Занятия лекционного типа			Занятия семинарского типа			Занятия лабораторного типа			Консультации			Всего							
Очная			Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная			Очная	Заочная	
1.Кристаллическая структура твердого тела	7			4											4			13		
2.Колебания и волны в кристаллической решетке	7			4											4			13		
3.Электроны в периодическом потенциале	7			4											4			13		
4.Статистика носителей заряда	7			4											4			1		
5.Квазиклассическое описание движения носителей заряда	7			4											4			13		
6.Неравновесные явления в полупроводниках	7			4											4			3		
7.Процессы переноса в неоднородных полупроводниках	7			4											4			13		
8.Магнитные	5			4											4			3		

свойства твердых тел																		
Промежуточная аттестация зачет																		
Итого	108		32											32			7 5	

## 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

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.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном

			полном объеме.	объеме, но некоторые с недочетами.	недочетами.	все задания в полном объеме.	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	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	<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>зачтено</b>	<b>отлично</b>	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»
	<b>очень хорошо</b>	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»
	<b>хорошо</b>	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»
	<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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

### 5.2.1 Контрольные вопросы

вопросы	Код формируемой компетенции
Особенности кристаллической структуры твердых тел и правила построения ячейки Вигнера-Зейтца.	ПК-1, ПК-3
Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок	ПК-1, ПК-3
Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.	ПК-1, ПК-3
Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.	ПК-1, ПК-3
Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.	ПК-1, ПК-3
Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии	ПК-1, ПК-3
Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.	ПК-1, ПК-3
Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.	ПК-1, ПК-3
Каковы магнитные свойства твердых тел?	ПК-1, ПК-3
Объясните правила построения и физический смысл ячейки Вигнера-Зейтца.	ПК-2, ПК-3
Вывести соотношение Эйнштейна $D = \frac{\mu k_B T}{e}$ , связывающее коэффициент диффузии и подвижность $\mu$ .	ПК-2, ПК-3
Вывести дисперсионную характеристику для акустических фононов в полупроводниковых кристаллах. Качественно объяснить причины возникновения оптических фононов в сложных кристаллических решетках.	ПК-2, ПК-3
Рассчитать скорость электрона в кремнии.	ПК-2, ПК-3
Рассчитать длину волны электрона в германии исходя из тепловой энергии $W_T$ и эффективной массы $m^*$ .	ПК-2, ПК-3
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 $E_g = (0.7 - 3 \cdot 10^{-4} T(K))$ эВ. Использовать значения эффективных масс $m_n = 0.02 m_0$ , $m_p = 0.2 m_0$ . Оценить температуру, при которой достигается экстремальное значение уровня Ферми, считая $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $m_n^* \approx m_0$ .	ПК-2, ПК-3
Определить спектр электрона в периодическом потенциале на основе модели Кронига-Пенни.	ПК-2, ПК-3
Удельное сопротивление собственного германия при 27°C равно 0,47 Ом·м. Вычислить концентрацию электронов и дырок.	ПК-2, ПК-3
Вычислить при комнатной температуре электропроводность германия, который содержит индий с концентрацией $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и сурьму с концентрацией $10^{21} \text{ м}^{-3}$ .	ПК-2, ПК-3

В момент времени $t_1 = 10^{-4}$ с после выключения равномерной по объему образца генерации электронно-дырочных пар неравновесная концентрация носителей оказалась в 10 раз больше, чем в момент $t_2 = 10^{-3}$ с. Определить время жизни неравновесных носителей тока, если уровень возбуждения невелик и рекомбинация идет через простые дефекты.	ПК-2, ПК-3
Исходя из времени релаксации импульса ( $10^{-13}$ с), эффективной массы электронов ( $0.55 m_0$ 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.	ПК-2, ПК-3
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.	ПК-2, ПК-3

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература

1. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. - Физика полупроводников: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1977. - 672 с. – 71 экз.
2. Шалимова, К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/648>. — Загл. с экрана.
3. Киттель Ч. «Элементарная физика твердого тела» Наука М. 1965 – 30 экз.

### б) дополнительная литература:

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1980. – 424 с. – 16 экз.
2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.П., «Полупроводниковые приборы» Высшая школа, М., 1981. – 8 экз.
3. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. - Микроэлектроника: Физические и технологические основы, надежность: [учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов]. - М.: Высшая школа, 1986. - 463, [1] с. – 14 экз.
4. Пикус Г.Е. «Основы теории полупроводниковых приборов» Наука, М., 1965 – 32 экз.
5. Зеегер К. «Физика полупроводниковых приборов» Мир, М., 1977 – 14 экз.
6. Киреев П. С. – «Физика полупроводников» [учеб. пособие для втузов]. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с. – 26 экз.
7. Ансельм А. И. – «Введение в теорию полупроводников» [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1978. - 615 с. – 21 экз.

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: компьютеры, проектор, доска.

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 ННГУ по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика».

Автор Волкова Е.В. \_\_\_\_\_

и.о. заведующего кафедрой Маругин А.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23