

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

Физика твердого тела

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

03.04.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Физическая электроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.06.01 Физика твердого тела относится к части, формируемой участниками образовательных отношений 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
ПК-1: Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области радиофизики, микро- и наноэлектроники, мощной электроники при решении задач своей профессиональной деятельности	ПК-1.1: Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач ПК-1.2: Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий	ПК-1.1: Знание основных понятий физики твердого тела. Знание основных направлений развития современной физики твердого тела. ПК-1.2: Умение работать со справочной литературой и базами данных по физике твердого тела. Владение навыком критического анализа информации по физике твердого тела, в том числе, полученной с использованием интернет-ресурсов. Умение объяснять физический смысл использованных формул. Владение навыком анализа зонных диаграмм полупроводниковых структур.	Реферат	Зачёт: Контрольные вопросы
ПК-2: Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских	ПК-2.1: Анализирует современное состояние исследований в области микро- и наноэлектроники, мощной электроники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов ПК-2.2: Выбирает и	ПК-2.1: Знание современного состояния исследований в области физики наноструктур. Умение анализировать зонные диаграммы гомо- и гетероструктур. ПК-2.2:	Собеседование	Зачёт: Задачи

работ в области радиофизики, микро- и наноэлектроники, мощной электроники и оформлять их результаты	применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи ПК-2.3: Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР ПК-2.4: Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области микро- и наноэлектроники, мощной электроники	Умение выбирать подход к решению поставленной задачи, применять аналитические и численные методы расчетов для получения конечного результата, умение проводить численные оценки. ПК-2.3: Знание основных принципов организации научного исследования. ПК-2.4: Владение навыками анализа полученных при решении задачи результатов, рассмотрения предельных случаев и формулировки выводов.		
ПК-3: Способен разрабатывать и подготавливать составные части документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок	ПК-3.1: Использует знание нормативных документов для составления заявок, грантов, проектов НИР, применяет заданные требования и правила при оформлении рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях ПК-3.2: Представляет результаты НИР академическому и бизнес-сообществу ПК-3.3: Участвует в составлении и подаче конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика	ПК-3.1: Умение оформлять протоколы, отчеты и рукописи в соответствии с предъявляемыми требованиями. Владение навыками составления и оформления научных обзоров. ПК-3.2: Владение навыком создания презентации и представления результатов. ПК-3.3: Умение объяснять экспериментальные данные на основе знаний, полученных в ходе освоения дисциплины.	Сообщение	Зачёт: Задания

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108

в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
самостоятельная работа	75
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

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/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
1. Элементы кристаллографии	20	6	0	6	14
2. Колебания кристаллической решетки.	20	6	0	6	14
3. Зонная теория твердых тел.	20	6	0	6	14
4. Полупроводники.	31	10	0	10	21
5. Магнитные свойства твердых тел.	16	4	0	4	12
Аттестация	0				
КСР	1				1
Итого	108	32	0	33	75

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Элементы кристаллографии.

Кристаллическая структура твердых тел. Трансляционная инвариантность, кристаллическая решетка, кристаллографический базис, элементарная ячейка. Понятие примитивной ячейки. Двумерные кристаллы. Решетки Браве для двумерных кристаллов. Трехмерные кристаллы. Решетки Браве для трехмерных кристаллов. Описание положений атомов, кристаллографических плоскостей и направлений в кристаллах. Типы связи. Примеры кристаллических структур. Дифракция на кристалле. Понятие обратной решетки. Дефекты в кристаллах.

2. Колебания кристаллической решетки.

Потенциал взаимодействия атомов. Колебания в простой цепочке атомов. Колебания в цепочке атомов двух сортов. Зоны Бриллюэна. Колебания атомов в трехмерной решетке. Понятие фонона. Теория

теплоемкости в приближениях Эйнштейна и Дебая. Тепловое расширение твердых тел.

3. Зонная теория твердых тел.

Электроны в периодическом потенциале. Уравнение Шредингера. Адиабатическое и одноэлектронное приближения. Теорема Блоха. Приближения для описания спектра электронов в кристаллах. Модель Кронига-Пенни. Заполнение разрешенных зон. Металлы, диэлектрики, полупроводники. Приближение эффективной массы. Понятие дырки.

4. Полупроводники.

Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Элементарная теория примесных состояний. Кинетические явления в полупроводниках. Явления на границах раздела материалов. Современные низкоразмерные наноструктуры и их основные преимущества.

5. Природа магнитных свойств материалов. Классификация магнетиков.

Практические 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.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

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.

1. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях : учеб. пособие / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2007. - 64 с.

2. Введение в физику полупроводниковых диодов и методы их проектирования с использованием высокопроизводительных вычислений. Авторы: Е.В. Волкова, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, Е.А. Тарасова: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2020. – 78 с.

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 - Реферат) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

Подготовить реферат на выбранную тему.

Критерии оценивания (оценочное средство - Реферат)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все части компетенции сформированы на уровне, не ниже "удовлетворительно".
не зачтено	Хотя бы одна часть компетенции сформирована на уровне «неудовлетворительно» или «плохо»

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

1. Качественно объясните возникновение оптической ветки колебаний в сложной цепочке атомов.
2. Качественно объясните причины появления разрешенных и запрещенных зон в энергетических спектрах электронов в кристаллах.
3. Будет ли влиять температура на контактную разность потенциалов приведенной структуры? Если нет, то почему, если да, то как именно?
4. Изменится ли (и если изменится, то как) величина и тип проводимости чистого Ge, если ввести в него примесь Р (расстояние от уровня примеси до ближайшей разрешенной зоны 0.013 эВ)?

Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все части компетенции сформированы на уровне, не ниже "удовлетворительно".
не зачтено	Хотя бы одна часть компетенции сформирована на уровне «неудовлетворительно» или «плохо»

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Сообщение) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Подготовить сообщение по теме реферата.

Критерии оценивания (оценочное средство - Сообщение)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Компетенция сформирована на уровне не ниже удовлетворительного. Сообщение подготовлено, оформлено в соответствии с требованиями и представлено слушателям в соответствии с нормами, принятыми в академических сообществах.
не зачтено	Хотя бы одна из частей компетенций сформирована на уровне ниже удовлетворительного. Студент не подготовил сообщение или допустил грубые ошибки в оформлении презентации и/или представлении материала.

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 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. Ошибок нет.	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 полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы 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	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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 оценивания при промежуточной аттестации

Оценка	Уровень подготовки
--------	--------------------

зачтено	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».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «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»
не зачтено	неудовлетворительно	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 ПК-1

1. Кристаллическая решетка. Примитивная ячейка. Решетки Браве.
2. Понятие обратной решетки. Индексы Миллера. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна.
3. Дифракция рентгеновского излучения на кристалле. Условие Вульфа-Брэгга. Построение Эвальда.
4. Колебания простой и сложной цепочки. Продольные и поперечные колебания.
5. Законы дисперсии для трехмерной решетки. Акустические и оптические фононы.
6. Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая.
7. Уравнение Шредингера для периодического потенциала. Теорема Блоха.
8. Модель Кронига-Пенни. Приближение гребенки Дирака. Зонная структура кристаллов: разрешенные и запрещенные зоны. Закон дисперсии.
9. Металлы, диэлектрики, полупроводники. Свободные носители заряда: электроны и дырки. Эффективные массы электронов и дырок. Экситоны.
10. Граничные условия Борна-Кармана. Плотность состояний.
11. Функция Ферми и поверхность Ферми. Заселение состояний в металлах, диэлектриках, полупроводниках.
12. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации импульса и энергии.
13. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.

14. Время жизни неравновесных носителей. Диффузия свободных носителей заряда. Ток диффузии и ток дрейфа. Возникновение внутреннего поля в неоднородном полупроводнике. Соотношение Эйнштейна.
15. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Максвелловская релаксация в проводящей среде. Время жизни неосновных носителей заряда. Диффузионная длина.
16. Эффект Холла.
17. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Антиферромагнетизм. Температура Кюри.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ на вопрос сформулирован, допускается наличие негрубых ошибок.
не зачтено	Студент не отвечает на вопрос или допускает грубые ошибки при ответе.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Определить, какие из приведенных на рисунке элементарных ячеек являются примитивными. Записать индексы Миллера изображенных кристаллографических плоскостей.
2. Доказать трансляционное условие, накладываемое на волновую функцию электронов в кристалле.
3. Исходя из экспериментальных данных зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры, найти его ширину запрещенной зоны.
4. Оценить температуру, при которой достигается экстремальное значение уровня Ферми в невырожденном полупроводнике, содержащем один тип однозарядных доноров. Считать, что $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $m_n^* \gg m_0$. Качественно пояснить, чем будет являться экстремум – максимумом или минимумом?
5. У кристаллов InSb диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 17$ и эффективная масса электронов $m^* = 0.015 m_0$. Исходя из водородоподобной планетарной модели атома примеси оценить радиус орбиты электрона, находящегося в InSb на примесном энергетическом уровне в основном состоянии, и глубину залегания примесного уровня в запрещенной зоне. Оценить минимальную концентрацию атомов примеси, при которой орбиты соседних атомов примеси будут перекрываться.
6. Найти отношение концентраций электронов в верхней (L) и основной (G) долинах невырожденного GaAs при $T=300 \text{ К}$ и при $T=1000 \text{ К}$. Считать, что эффективная масса электронов в верхней долине в 15 раз больше эффективной массы электронов в основной

долине. Энергетический зазор между долинами составляет $W_S=0,35$ эВ. Будут ли отличаться значения проводимости материала при данных температурах?

7. Определить концентрацию неравновесных носителей заряда на поверхности полубесконечного образца n -Ge, если оптическая генерация электронно-дырочных пар равномерна по объему, скорость генерации составляет $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, время жизни неосновных носителей $t_p=4 \times 10^{-6} \text{ с}$, а скорость поверхностной рекомбинации составляет $S_p=500 \text{ см/с}$. Коэффициент диффузии $D_p=49 \text{ см}^2/\text{с}$.
8. Исходя из среднего времени свободного пробега ($t \gg 10^{-13} \text{ с}$), эффективной массы электронов ($m_n^* = 0.36 \times m_0$) и ширины запрещенной зоны ($W_g = 0.66 \text{ эВ}$) оценить напряженность электрического поля, при которой возникает лавинный пробой в германии. Оценить напряжение пробоя в резко несимметричном германиевом p - n переходе. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 16$. Концентрация доноров в менее легированной n -области $ND=2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.
9. Найти контактную разность потенциалов в диоде Шоттки n -Ge/Au. Нарисовать зонную диаграмму контакта при термодинамическом равновесии. Удельное сопротивление полупроводника $r=1 \text{ Ом} \times \text{см}$. Работа выхода электронов из золота $4,7 \text{ эВ}$. Электронное сродство Ge 4 эВ , ширина запрещенной зоны $W_g=0,66 \text{ эВ}$. Концентрация электронов в собственном германии составляет $n_i=2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
10. Имеется идеальная структура металл/диэлектрик/полупроводник n -типа. Разница энергий между уровнем Ферми и серединой запрещенной зоны в полупроводнике $F-W_i=e\phi_0$. Доказать, что при значении поверхностного потенциала $\phi_s=2\phi_0$ вблизи границы полупроводника и диэлектрика будет содержаться слой инверсной проводимости. Нарисовать зонные диаграммы при $\phi_s=0$ и при $\phi_s=2\phi_0$.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент решает задачу, возможно, допуская негрубые ошибки в расчетах.
не зачтено	Студент не решает задачу или допускает очень грубые ошибки в процессе решения.

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. По заданным параметрам построить зонную диаграмму гетероконтакта.
2. По ВФХ структуры металл-полупроводник найти концентрацию легирующей примеси в полупроводнике.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент выполняет задание. Допускаются негрубые ошибки.
не зачтено	Студент не выполняет задание или допускает грубые ошибки.

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

Основная литература:

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников / Шалимова К. В. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 384 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-0922-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799695&idb=0>.
2. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. - М. : Наука, 1990. - 685 с. : ил. - ISBN 5-02-014032-5 : 2.00., 7 экз.
3. Демиховский Валерий Яковлевич. Физика квантовых низкоразмерных структур / В. Я. Демиховский, Г. А. Вугальтер. - М. : Логос, 2000. - 248 с. : ил. - ISBN 5-88439-045-9 : 25.00., 3 экз.
4. Ансельм Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников = Introduction to the Semiconductor Theory : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по физ. и техн. направлениям и специальностям. - Изд. 3-е, стер. - СПб. : Лань, 2008. - 624 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике / ред. совет: Ж. И. Алферов (пред.) [и др.]) (Учебники для вузов. Специальная литература) (Лучшие классические учебники). - ISBN 978-5-8114-0762-0 : 419.50., 25 экз.

Дополнительная литература:

1. Гуртов Валерий Алексеевич. Физика твердого тела для инженеров : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям 210100 "Электроника и нанoeлектроника", 223200 "Техн. физика". - Изд. 2-е, испр. и доп. - М. : Техносфера, 2012. - 560 с. - (Мир физики и техники ; 2 - 27). - ISBN 978-5-94836-327-1 : 400.00., 1 экз.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / [пер. под общ. ред. А. А. Гусева]. - Изд. 2-е, стер., перепеч. с изд. 1978 г. - М. : МедиаСтар, 2006. - 792 с. - 525.00., 45 экз.

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

<http://www.matprop.ru/> - тематические базы данных.

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 03.04.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Волкова Екатерина Валерьевна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18.12.2023, протокол № 09/23.