

**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  
президиума ученого совета ННГУ  
протокол от " 16 " января 2024 г. № 1

**Рабочая программа дисциплины**  
**Физика твердого тела**

Уровень высшего образования  
**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Программа аспирантуры  
**Радиофизика**

Научная специальность  
**1.3.4 Радиофизика**

Форма обучения  
**Очная**

Нижегород  
2024 год начала подготовки

## 1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Физика твердого тела» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2-ом году обучения в 3 семестре.

**Цель дисциплины** – углубленное ознакомление аспирантов с особенностями физики твердого тела, а также методами теоретического описания металлов, полупроводников, диэлектриков и гибридных структур.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

### **Знать:**

- современное состояние науки в области радиофизики, знать такие понятия как сверхпроводимость, диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм, фотоионизация и фотопроводимость;
- такие понятия, как кристаллическая решетка, элементарная ячейка, кристаллографические направления и др.;

### **Уметь:**

- определять наиболее актуальные направления исследований;
- самостоятельно формулировать новые научные задачи в области радиофизики и предполагаемые методы их решения, исходя из тенденций развития науки в области радиофизики и этапов профессионального роста;
- при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи;
- представлять научные результаты;
- самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования;
- оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения;

### **Владеть:**

- навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики;
- навыками использования современных средств вычислительной техники для расчетов параметров кристаллических структур;
- навыками моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов, владеть навыками проводить моделирование параметров кристаллических структур с учетом изменяющихся внешних факторов;
- современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования, владеть навыком проводить статистический анализ параметров кристаллических структур, сопоставлять его с данными эксперимента и проводить обобщение полученных результатов;
- владеть методами планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций, владеть методикой составления программы - методики изучения твердых тел и обобщать результаты.

## 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 1

## 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. Введение. Кристаллическая структура твердого тела	12	6	-	-	-	6	6
2. Колебания и волны в кристаллической решетке. Электроны в периодическом потенциале	10	5	-	-	-	5	5
3. Статистика носителей заряда	10	5	-	-	-	5	5
4. Квазиклассическое описание движения носителей заряда	10	5	-	-	-	5	5
5. Неравновесные явления в полупроводниках. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках.	10	5	-	-	-	5	5
6. Магнитные свойства твердых тел	10	5	-	-	-	5	5
7. Сверхпроводимость	10	5	-	-	-	5	5
Аттестация по дисциплине - зачет	-						
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>36</b>	<b>36</b>

Таблица 2

## Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Введение. Кристаллическая структура твердого тела	Кристаллические решетки. Элементарная ячейка. Симметрии. Решетки Браве. Кристаллографические направления. Области Дирихле. Обратная решетка. Индексы Миллера. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна. Рентгеноструктурный анализ кристаллов. Описание решетки кремния.	Лекции	-
2	Колебания и волны в кристаллической решетке. Электроны в периодическом потенциале	Колебания простой и сложной цепочки. Продольные и поперечные колебания. Решетка с одним атомом в ячейке. Решетка с несколькими атомами в ячейке. Законы дисперсии для трехмерной решетки. Акустические и оптические фононы. Теория теплоемкости Дюлонга-Пти. Квантовый	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющим

		<p>подход к описанию кристаллов. Статика Бозе-Эйнштейна. Теории теплоемкости Эйнштейна и Дебая. Уравнение Шредингера для периодического потенциала. Теорема Блоха. Модель Кронига-Пени. Зонная структура кристаллов: разрешенные и запрещенные зоны. Закон дисперсии. Классификация: металлы, диэлектрики, полупроводники. Классификация: ковалентные и ионные кристаллы. Свободные носители заряда: электроны и дырки. Эффективные массы электронов и дырок. Граничные условия Борна-Кармана. Плотность состояний.</p>		ему по электронной почте
3	Статистика носителей заряда	<p>Функция Ферми и поверхность Ферми. Заселение состояний в металлах и диэлектриках. Электронная теплоемкость в металлах. Заселение состояний в полупроводниках. Уравнение электронейтральности. Уровень Ферми и концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках. Область истощения примесей. Основные и неосновные носители заряда. Управление проводимостью с помощью легирования.</p>	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
4	Квазиклассическое описание движения носителей заряда	<p>Свободное движение волнового пакета. Кинетическое уравнение Больцмана. Механизмы рассеяния носителей заряда: примесное рассеяние, рассеяние на акустических фонах, рассеяние на оптических фонах, рассеяние на дефектах, электрон-электронное рассеяние. Квазигидродинамическое приближение. Подвижность носителей. Циклотронный резонанс. Эффект Холла.</p>	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
5	Неравновесные явления в полупроводниках. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках.	<p>Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей. Время жизни неравновесных носителей. Диффузия свободных носителей заряда. Ток диффузии и ток дрейфа. Возникновение внутреннего поля в неоднородном полупроводнике. Соотношение Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов.</p>	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте

		Максвелловская релаксация в проводящей среде. Время жизни неосновных носителей заряда. Диффузионная длина.		
6	Магнитные свойства твердых тел	Магнитная восприимчивость и намагниченность. Энергия магнитного дипольного взаимодействия. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Антиферромагнетизм. Температура Кюри. Возникновение доменных структур.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
7	Сверхпроводимость	Нулевое сопротивление. Критическая температура. Низкотемпературные и высокотемпературные сверхпроводники. Поведение сверхпроводников в магнитном поле. Эффект Мейснера. Критические магнитные поля. Сверхпроводники 1 и 2 рода. Теория Гинзбурга-Ландау и параметр порядка. Квантование магнитного потока. Вихри Абрикосова. Туннельный эффект Джозефсона. Джозефсоновские контакты и Джозефсоновские вихри.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте

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

Еженедельно текст прочитанной лекции и соответствующие вопросы для контроля текущей успеваемости из списка 5.2 рассылаются по электронной почте обучающимся для стимулирования самостоятельной внеаудиторной работы и создания личного портфолио по дисциплине «Физика твердого тела».

#### 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);
- 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 зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

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

1. Особенности кристаллической структуры твердых тел и правила построения ячейки Вигнера-Зейтца.
2. Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок
3. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.
4. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.
5. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.
6. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии
7. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.
8. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.
9. Каковы магнитные свойства твердых тел?
10. Каковы сверхпроводящие свойства твердых тел?

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

а) основная литература:

1. Зи С. М. - Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. - М. : Мир , 1984. - 455 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. - Физика полупроводников: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1977. - 672 с.
3. Киттель Ч. - Элементарная физика твердого тела. - М.: Наука, 1965. - 366 с.

б) дополнительная литература:

1. Пикус Г. Е. - Основы теории полупроводниковых приборов. - М.: Наука, 1965. - 448 с.
2. Зеегер К. - Физика полупроводников: пер. с англ. Р. Бразиса [и др.]. - М.: Мир, 1977. - 615 с.
3. Киреев П. С. – «Физика полупроводников» [учеб. пособие для втузов]. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:  
Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):  
<http://e.lanbook.com/>;  
<http://www.biblioclub.ru>.

## 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.

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).

Автор: к.ф.-м.н. Д.А. Савинов

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. А.В. Кудрин

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., снс С.А. Бельков

**Программа одобрена** на заседании Методической комиссии радиофизического факультета от «18» декабря 2023 года, протокол № 09/23.