

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

---

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 4 от 26.04.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Квантовая теория твердого тела

---

Уровень высшего образования

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника

---

Направленность образовательной программы

Квантовые и нейроморфные технологии

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.01 Квантовая теория 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 обоснованно выбирать и применять теоретические и экспериментальные методы научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий	<p>ПК-1.1: Знаком с теоретическими и экспериментальными методами научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p> <p>ПК-1.2: Анализирует и выбирает теоретические и экспериментальные методы научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p> <p>ПК-1.3: Применяет теоретические и экспериментальные методы научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p>	<p>ПК-1.1:</p> <p>Знать основные методы квантовой теории твердого тела.</p> <p>Уметь пользоваться основными методами квантовой теории твердого тела.</p> <p>Владеть навыками применения основных методов квантовой теории твердого тела.</p> <p>ПК-1.2:</p> <p>Знать явления в физике твердого тела, объясняемые с точки зрения квантовой теории.</p> <p>Уметь интерпретировать экспериментальные результаты в области физики твердого тела с точки зрения квантовой теории.</p> <p>Владеть навыками анализа квантовых явлений в твердых телах.</p> <p>ПК-1.3:</p> <p>Знать подходы к получению новых знаний и умений в области квантовой теории твердого тела.</p>	Задания	Зачёт: Контрольные вопросы

		<p>Уметь самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твердого тела.</p> <p>Владеть способностью самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения в области квантовой теории твердого тела.</p>		
--	--	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>2</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>16</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>39</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</b>

#### 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
Введение	1	1		1	

Тема 1. Одноэлектронное приближение	18	4	4	8	10
Тема 2. Колебания решётки	18	4	4	8	10
Тема 3. Элементарные возбуждения, квазичастицы	16	3	4	7	9
Тема 4. Сверхпроводимость	18	4	4	8	10
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	16	16	33	39

### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Уравнение Шредингера кристалла. Адиабатическое приближение.
2. Одноэлектронное приближение. Методы Хартри и Хартри-Фока. Общие свойства электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Периодичность и чётность энергии электрона в К-пространстве. Циклические условия Борна-Кармана. Зоны Бриллюэна. Число разрешённых значений волнового вектора в зоне Бриллюэна. Модель почти свободных электронов. Вывод уравнения для коэффициентов разложения волновой функции по плоским волнам. Модель почти свободных электронов. Теория возмущений до второго порядка для волновых функций и энергии электрона. Модель почти свободных электронов. Условие брэгговского отражения электронных волн. Границы зон Бриллюэна. Приближение сильной связи для электронов в кристалле. sp<sup>3</sup>-гибридизация. Изознергетические поверхности. Поверхность Ферми. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми. Эффективная масса в законе дисперсии для электронов в кристалле. Эффективная масса проводимости.
3. Колебания решётки. Нормальные координаты. Закон дисперсии для колебаний. Простая одномерная решётка, одномерная решётка с базисом. Обобщение на трёхмерный случай. Квантование колебаний решётки. Фононы. Вторичное квантование для фононов.
4. Элементарные возбуждения, квазичастицы. Виды элементарных возбуждений. Вторичное квантование для электронов. Взаимодействие между фононами. Анггармонические эффекты. Электрон-фононное взаимодействие. Рассеяние электронов.
5. Сверхпроводимость. Косвенное электрон-электронное взаимодействие в сверхпроводимости. Связанные электронные пары в Ферми-газе. Неустойчивость Ферми-системы при наличии притяжения электронов. Редуцированный гамильтониан БКШ. Сверхпроводник из двух частиц. Устойчивость токового состояния сверхпроводника.

#### 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.

Авторские презентации по материалам лекций.

#### 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 - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

1. Записать уравнение Шредингера для кристалла. Объяснить физический смысл слагаемых оператора Гамильтона.
2. В адиабатическом приближении разделить переменные в уравнении Шредингера для кристалла, получить уравнения для электронной и ядерной частей.
3. Показать, что волновой вектор электрона в периодическом поле определен неоднозначно.
4. Показать, что в центре и на некоторых гранях зоны Бриллюэна энергия электрона  $\epsilon$  в зависимости от волнового вектора  $k$  имеет экстремум. На каких гранях зоны Бриллюэна.
5. Показать, что обратная решетка простой кубической решетки также является простой кубической.
6. Показать, что решетка, обратная гранецентрированной, объемцентрирована, и наоборот, решетка, обратная объемцентрированной, гранецентрирована.
7. Найти структуру решетки, обратной решетке со структурой алмаза.
8. Оценить порядок слагаемых уравнения Шредингера для кристалла, которыми пренебрегают при разделении электронного и ядерного движений в адиабатическом приближении.
9. Найти объем элементарной ячейки обратной решетки.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся успешно показал умения и навыки выполнения заданий базового уровня сложности
не зачтено	Обучающийся не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения заданий

### 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического	Уровень знаний ниже минимальных	Минимально допустимы	Уровень знаний в объеме,	Уровень знаний в объеме,	Уровень знаний в объеме,	Уровень знаний в объеме,

	материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	требований. Имели место грубые ошибки	й уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	соответству ющем программе подготовки . Допущено несколько негрубых ошибок	соответству ющем программе подготовки . Допущено несколько несуществе нных ошибок	соответств ующем программе подготовк и. Ошибок нет.	превышающе м 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 и 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 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	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	<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>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «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»

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. В каких случаях неприменимо адиабатическое приближение?
2. Укажите главный недостаток представления поля, действующего на данный электрон со стороны других электронов в форме (приближение Хартри).
3. Как недостатки приближения Хартри устраняются в приближении Хартри-Фока?
4. Укажите недостатки приближения Хартри-Фока.
5. Зачем вводятся циклические граничные условия Борна-Кармана?
6. Сколько значений волнового вектора в зоне Бриллюэна?
7. Что представляет собой решетка, обратная обратной?

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся отвечает полностью на контрольные вопросы, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
не зачтено	Обучающийся показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.

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

Основная литература:

1. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / Ансельм А. И. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 624 с. - Допущено Научно-методическим советом по физике Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по физическим и техническим направлениям и специальностям. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-0762-0., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=800200&idb=0>.
2. Прудников В. В. Квантово-статистическая теория твердых тел / Прудников В. В., Прудников П.

В., Мамонова М. В. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 448 с. - Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области прикладных математики и физики в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению «Прикладные математика и физика», а также по другим математическим и естественнонаучным направлениям и специальностям и смежным направлениям и специальностям в области техники и технологий. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-507-44520-2., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=803320&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Авдеев Сергей Петрович. Краткий обзор теории полупроводниковых структур : Учебное пособие. - Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2018. - 118 с. - ВО - Магистратура. - ISBN 978-5-9275-2721-2., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=627291&idb=0>.
2. Долгополов В. Т. Взаимодействующие электроны в нормальных металлах. Методы описания Ферми-жидкости : лекции / Долгополов В. Т. - Черноголовка : ИФТТ РАН!, 2021. - 66 с. - Книга из коллекции ИФТТ РАН! - Физика., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=797735&idb=0>.

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

- 1) Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом [www.eqworld.ipmnet.ru](http://www.eqworld.ipmnet.ru);
- 2) интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.ru/>.

## **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 28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор(ы): Демидов Евгений Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Рецензент(ы): Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 15.04.2024, протокол № б/н.