

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 конденсированного состояния

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Фундаментальная радиофизика

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.07 Физика конденсированного состояния 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 текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики	<p>ПК-1.1: Применяет основные методы анализа текущей научной и научно-технической литературы в области физики и радиофизики</p> <p>ПК-1.2: Анализирует текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики</p>	<p>ПК-1.1: Знать основные принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования Уметь использовать на практике принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования Владеть опытом работы на современной радиоэлектронной и оптической аппаратуре и оборудовании</p> <p>ПК-1.2: Знать основные принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования Уметь использовать на практике принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования Владеть опытом работы на современной</p>	Контрольная работа	Экзамен: Контрольные вопросы

		радиоэлектронной и оптической аппаратуре и оборудовании		
<p>ПК-2: Способен осваивать и применять новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики</p>	<p>ПК-2.1: Обладает базовыми знаниями, необходимыми для освоения новейших методов проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики</p> <p>ПК-2.2: Осваивает и применяет новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики</p>	<p>ПК-2.1: Знать современные образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области физики конденсированного состояния Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области физики конденсированного состояния, используя современные образовательные и информационные технологии Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области физики конденсированного состояния с использованием современных образовательных и информационных технологий</p> <p>ПК-2.2: Знать современные образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области физики конденсированного состояния Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области физики конденсированного состояния, используя современные образовательные и информационные технологии Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области физики конденсированного состояния с использованием современных образовательных и информационных технологий</p>	Контрольная работа	Экзамен: Контрольные вопросы Задачи

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)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	13
Промежуточная аттестация	45 Экзамен

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	
Тема 1. Теория Друде и Зоммерфельда	10	5	3	8	2
Тема 2. Кристаллическая решетка	11	5	3	8	3
Тема 3. Основы зонной теории	10	5	3	8	2
Тема 4. Квазиклассическая модель	11	6	3	9	2
Тема 5. Фононы	10	5	3	8	2
Тема 6. Магнитные свойства	9	6	1	7	2
Аттестация	45				
КСР	2			2	
Итого	108	32	16	50	13

Содержание разделов и тем дисциплины

Практические занятия (семинарские 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

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.

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы,
- выполнение домашних заданий по решению задач.

Текущий контроль усвоения материала проводится путем проведения контрольных работ во время практических занятий и проверки выполнения домашних заданий.

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 - Контрольная работа) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

Контрольная работа формируется на основе контрольных вопросов.

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

Контрольная работа формируется на основе задач для промежуточной аттестации

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольная работа)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Превосходная подготовка без недочетов
отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с очень незначительными погрешностями
очень хорошо	В целом хорошая подготовка с некоторыми ошибками
хорошо	Хорошая подготовка, но с рядом заметных ошибок

Оценка	Критерии оценивания
удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям
неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания
плохо	Подготовка совершенно недостаточная

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	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 базовых навыков. Невозможность оценить наличие	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые	Имеется минимальный набор навыков для	Продемонстрированы базовые навыки при решении	Продемонстрированы базовые навыки при решении	Продемонстрированы навыки при решении	Продемонстрирован творческий подход к решению

	навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	навыки. Имели место грубые ошибки	решения стандартных задач с некоторым и недочетами	стандартных задач с некоторым и недочетами	стандартных задач без ошибок и недочетов	нестандартных задач без ошибок и недочетов	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

ТЕОРИЯ МЕТАЛЛОВ ДРУДЕ И ЗОММЕРФЕЛЬДА

1. Основные положения, лежащие в основе теории металлов. Концепция модели свободных электронов, длина свободного пробега.
2. Высокочастотная проводимость металлов. Продольные и поперечные волны в твердотельной плазме.
3. Тензор проводимости металла в магнитном поле.
4. Электронная теплопроводность металлов в модели Друде. Закон Видемана-Франца.
5. Фермионы и бозоны, принцип запрета Паули

6. Граничное условие Борна-Кармана.
7. Понятие химического потенциала. Температурная зависимость химического потенциала.
8. Теплопроводность и теплоемкость в модели Зоммерфельда.
9. Адиабатическое приближение. Приближение Борна-Оппенгеймера.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

10. Элементы симметрии кристаллической решетки.
11. Понятие о решетке Бравэ (элементарная ячейка, условно-элементарная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца).
12. Обратная решетка (определение и свойства). Вектора обратной решетки. Ячейка Бриллюэна.
13. Условие дифракции Лауэ. Эквивалентность условий дифракции Брэгга- Вульфа и Лауэ.

ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

14. Уравнение Шредингера для электрона в периодическом потенциале.
15. Обобщенное граничное условие Борна-Кармана для периодического потенциала.
16. Заполнение энергетических зон электронами. Металлы. Диэлектрики. Полупроводники.
17. Модель Кронига-Пенни.

КВАЗИКЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ

18. Основные положения квазиклассической модели. Электроны как волновые пакеты.
19. Электроны и дырки.
20. Эффективная и циклотронная массы электрона.
21. Кинетическое уравнение. Интеграл столкновений. Приближение времени релаксации.

КОЛЕБАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ. ФОНОНЫ

22. Динамика решетки. Гармоническое приближение.
23. Нормальные моды одномерной решетки с базисом.
24. Квантовая теория колебаний решетки. Фононы.
25. Закон дисперсии акустических фононов при малых k . Соотношение Бома- Ставера.
26. Квантовая теория теплоемкости.

27. Теплоемкость. Приближение Эйнштейна.
28. Ангармонизм колебаний решетки. Тепловое расширение твердых тел.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА.

29. Сверхпроводимость. Зависимость сопротивления от температуры. Эффект Мейсснера.

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

ТЕОРИЯ МЕТАЛЛОВ ДРУДЕ И ЗОММЕРФЕЛЬДА

1. Статическая электропроводность металлов.
2. Эффект Холла, постоянная Холла.
3. Нормальный скин-эффект. Поверхностный импеданс металлов. Аномальный скин-эффект.
4. Распределения Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака, и Бозе-Эйнштейна.
5. Свойства вырожденного Ферми газ при $T=0$ (поверхность, скорость, импульс и энергия Ферми).
6. Понятие плотности состояний (энергетических уровней). Плотность состояний для свободных и невзаимодействующих электронов в 1D, 2D и 3D случаях;
7. Теория проводимости в модели Зоммерфельда.
8. Недостатки модели свободных электронов.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

9. Дифракция рентгеновского излучения в кристаллах. Условие дифракции Брэгга-Вульфа.
10. Вид и базисы простейших решеток: ПК – простая кубическая; ОЦК – объемно-центрированная кубическая; ГЦК – гранецентрированная кубическая.
11. Понятие атомной плоскости. Индексы Миллера.

ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

12. Теорема Блоха. Доказательство теоремы Блоха.
13. Зоны Бриллюэна и энергетические зоны. Энергетическая щель.
14. Приближение слабого периодического потенциала. (Модель слабой связи).
15. Метод сильной связи для расчета зонной структуры. Функции Ванье.

КВАЗИКЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ

16. Движение в постоянных электрическом и магнитном полях. Типы траекторий.
17. Квантование орбит электрона во внешнем постоянном магнитном поле. Уровни Ландау
18. Неравновесная и равновесная функции распределения электронов.
19. Статическая электропроводность в полуклассической модели.

КОЛЕБАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ. ФОНОНЫ

20. Недостатки модели статической решетки.
21. Нормальные моды одномерной монокристаллической решетки Браве.
22. Акустические и оптические моды колебаний решетки.
23. Законы дисперсии акустических и оптических фононов при малых k .
24. Теплоемкость металлов. Закон Дюлонга и Пти.
25. Теплоемкость. Интерполяционная формула Дебая.
26. Электронная теплоемкость.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА.

27. Дипольный магнетизм Ландау.
28. Парамагнетизм Паули.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Превосходная подготовка без недочетов
отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с очень незначительными погрешностями
очень хорошо	В целом хорошая подготовка с некоторыми ошибками
хорошо	Хорошая подготовка, но с рядом заметных ошибок
удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям
неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания
плохо	Подготовка совершенно недостаточная

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

Тема 1: Кристаллическая и обратная решетки

1.1 Доказать, что кристаллическая решетка может обладать поворотными осями симметрии 2, 3, 4 и 6 порядков.

1.2 Показать, что основные вектора $\bar{b}_1, \bar{b}_2, \bar{b}_3$ обратной решетки $\bar{K} = m_1\bar{b}_1 + m_2\bar{b}_2 + m_3\bar{b}_3$ следующим образом выражаются через вектора $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3$ прямой решетки:

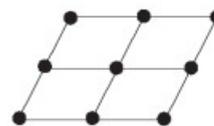
$$\bar{b}_1 = \frac{2\pi}{V}[\bar{a}_2 \times \bar{a}_3], \quad \bar{b}_2 = \frac{2\pi}{V}[\bar{a}_3 \times \bar{a}_1], \quad \bar{b}_3 = \frac{2\pi}{V}[\bar{a}_1 \times \bar{a}_2]$$

где $V = \bar{a}_1 \cdot [\bar{a}_2 \times \bar{a}_3]$ - объем элементарной ячейки прямой решетки.

1.3 Показать, что решетка, обратная к обратной, совпадает с прямой решеткой.

1.4 Доказать соотношение $V_K = (2\pi)^n / V$, где V_K - объем элементарной ячейки обратной решетки, V - объем элементарной ячейки кристаллической решетки, n - число измерений. Рассмотреть случаи $n = 2, 3$.

1.5 Построить ячейку Вигнера-Зейтца для двумерной решетки Бравэ вида



1.6 Записать вектора основных трансляций для простой кубической (ПК), объемноцентрированной кубической (ОЦК) и гранецентрированной кубической (ГЦК) решеток.

1.7 Найти вектора обратной решетки для простой кубической (ПК), объемноцентрированной кубической (ОЦК) и гранецентрированной кубической (ГЦК) решеток. Использовать вектора основных трансляций для прямых решеток в виде:

(ПК) $\bar{a}_1 = a\bar{x}_0, \bar{a}_2 = a\bar{y}_0, \bar{a}_3 = a\bar{z}_0$;

(ОЦК) $\bar{a}_1 = \frac{a}{2}(\bar{y}_0 + \bar{z}_0 - \bar{x}_0), \bar{a}_2 = \frac{a}{2}(\bar{z}_0 + \bar{x}_0 - \bar{y}_0), \bar{a}_3 = \frac{a}{2}(\bar{x}_0 + \bar{y}_0 - \bar{z}_0)$;

(ГЦК) $\bar{a}_1 = \frac{a}{2}(\bar{y}_0 + \bar{z}_0), \bar{a}_2 = \frac{a}{2}(\bar{z}_0 + \bar{x}_0), \bar{a}_3 = \frac{a}{2}(\bar{x}_0 + \bar{y}_0)$;

где a - постоянная кристаллической решетки.

1.8 Построить обратную решетку и первые три зоны Бриллюэна для квадратной двумерной решетки ($a \times a$).

1.9 Построить обратную решетку и первые две зоны Бриллюэна для прямоугольной решетки с соотношением сторон $1 : 2$ ($a \times 2a$).

1.10 Показать, что для каждого семейства атомных плоскостей, отстоящих друг от друга на расстояние d , существует такие вектора обратной решетки, которые перпендикулярны к этим плоскостям, причем наименьший из них имеет длину $2\pi/d$.

1.11 Доказать эквивалентность условия дифракции рентгеновских лучей Лауэ и условия Брегга-Вульфа: $2d \sin \theta = n\lambda$, где d - наименьшее расстояние между атомными плоскостями, θ - угол падения, λ - длина волны падающего излучения.

Тема 2: Термодинамические свойства газа свободных невзаимодействующих электронов. Теория металлов Зоммерфельда

2.1 Используя большое каноническое распределение Гиббса, получить функции распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.

2.2 Определить радиус сферы Ферми k_F вырожденного газа свободных и независимых электронов с концентрацией $n = N/V$, где N - число электронов в объеме V .

2.3 Определить импульс Ферми p_F вырожденного газа свободных и независимых электронов с концентрацией $n = N/V$, где N - число электронов в объеме V .

2.4 Определить при $T = 0$ химический потенциал μ вырожденного газа свободных и независимых электронов с концентрацией $n = N/V$, где N - число электронов в объеме V .

2.5 Вычислить при $T = 0$ среднюю энергию газа вырожденного газа свободных и независимых электронов в расчете на одну частицу.

2.6 Вычислить плотность состояний $g(\varepsilon)$ для системы свободных невзаимодействующих электронов. Рассмотреть случаи одномерного, двумерного и трехмерного движения электронов.

2.7 Определить температурную зависимость химического потенциала $\mu(T)$ вырожденного газа свободных невзаимодействующих электронов с фиксированным числом частиц,

2.8 Определить температурную зависимость химического потенциала $\mu(T)$ для системы с фиксированным числом ферми-частиц с произвольной зависимостью плотности состояний от энергии.

2.9 Определить температурную зависимость средней энергии газа вырожденного газа свободных и независимых электронов в расчете на одну частицу.

2.10 Вычислите удельную теплоемкость газа при постоянном объеме c_V для системы свободных невзаимодействующих электронов при низких температурах.

2.11 Вычислите удельную теплоемкость газа при постоянном объеме c_V для системы ферми-частиц с произвольной зависимостью плотности состояний от энергии при низких температурах.

2.12 Найти давление газа электронов, подчиняющихся статистике Ферми-Дирака.

2.13 Вычислить магнитную восприимчивость χ вырожденного газа свободных невзаимодействующих электронов определяется выражением.

Тема 3: Транспортные свойства газа свободных невзаимодействующих электронов. Теория Друде и Зоммерфельда.

- 3.1 Вычислить удельную проводимость металла σ на постоянном токе в модели Друде.
- 3.2 Вычислить тензор проводимости металла в магнитном поле в модели Друде.
- 3.3 Вычислить высокочастотную проводимость металла $\sigma(\omega)$ в модели Друде.
- 3.4 Вычислить диэлектрическую проницаемость $\varepsilon(\omega)$ металла в модели Друде.
- 3.5 Вычислить электронную теплопроводность κ металла в модели Друде.
- 3.6 Пусть металл, находящийся при постоянной температуре, помещен в однородное постоянное электрическое \vec{E} . Вычислить в модели Друде среднюю энергию, передаваемую движущимся электроном кристаллической решетке, за одно столкновение (τ - среднее время между столкновениями).
- 3.7 Пусть металл, находящийся при постоянной температуре, помещен в однородное постоянное электрическое \vec{E} . Вычислить в модели Друде среднюю потерю энергии всеми электронами в проводнике в 1 см^3 за 1 сек. (τ - среднее время между столкновениями).
- 3.8 Вычислить компоненты тензора проводимости σ ($j_k = \sigma_{kl}E_l$) для кристалла в магнитном поле с учетом рассеяния (эффект Холла).
- 3.9 Вычислить электронную теплопроводность κ металла в модели Зоммерфельда.
- 3.10 Вычислить теплопроводность металла в модели Зоммерфельда, используя кинетическое уравнение Больцмана.
- 3.11 Вычислить удельную проводимость металла, используя кинетическое уравнение Больцмана.
- 3.12 Вычислить удельную проводимость металла в слабом магнитном поле, используя кинетическое уравнение Больцмана (эффект Холла).

Тема 4: Электрон в периодическом потенциале. Зонная теория.

- 4.1 Рассчитать энергетические уровни и зонный спектр электрона в одномерной решетке с периодом d , где потенциальная энергия имеет вид

$$U(x) = \begin{cases} U_0, & -b \leq x \leq 0 \\ 0, & 0 \leq x \leq a = d - b \end{cases} \quad U(x+d) = U(x).$$

Рассмотреть случай, когда $U_0 \rightarrow \infty$, $b \rightarrow 0$, но $U_0 b = \text{const}$ (модель Кронига-Пенни).

- 4.2 Пользуясь приближением слабой связи, найти зонный спектр для электрона в одномерной решетке с потенциалом $U(x) = U_0[3 + 2\cos(2\pi x/a)]$, ($U_0 \ll 1$).

- 4.3 Пользуясь приближением слабой связи, найти волновые функции (включая состояния вблизи границы зоны Бриллюэна) для электрона в одномерной решетке с потенциалом $U(x) = U_0[3 + 2\cos(2\pi x/a)]$, ($U_0 \ll 1$).

- 4.4 Используя приближение сильной связи для описания электронов в простой кубической (ПК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти

дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Показать, что изоэнергетические поверхности имеют сферическую симметрию при $k \rightarrow 0$.

4.5 Используя приближение сильной связи для описания электронов в простой кубической (ПК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Определить эффективную массу электронов при $k \rightarrow 0$.

4.6 Используя приближение сильной связи для описания электронов в гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Показать, что изоэнергетические поверхности имеют сферическую симметрию при $k \rightarrow 0$.

4.7 Используя приближение сильной связи для описания электронов в гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Определить эффективную массу электронов при $k \rightarrow 0$.

4.8 Используя приближение сильной связи для описания электронов в объемноцентрированной кубической (ОЦК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Показать, что изоэнергетические поверхности имеют сферическую симметрию при $k \rightarrow 0$.

4.9 Используя приближение сильной связи для описания электронов в объемноцентрированной кубической (ОЦК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Определить эффективную массу электронов при $k \rightarrow 0$.

4.10 Рассмотрим одномерную периодическую структуру. Пусть вблизи границы зоны Бриллюэна в энергии частицы может быть записана в следующем виде:

$$\varepsilon(k) = \sqrt{\Delta^2 + [k^2 - (k - K)^2]^2},$$

где k - квазиимпульс, K - вектор обратной решетки. Какой вид имеют волновые функции электрона при $|\varepsilon| < \Delta$, когда его энергия выбрана в запрещенной зоне?

Тема 5: Квазиклассические уравнения динамики электрона.

5.1 Вывести уравнения полуклассической динамики электронов в твердом теле

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}_n(\mathbf{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial \varepsilon_n(\mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}}, \quad \hbar \frac{d\mathbf{k}}{dt} = e \left[\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{1}{c} \mathbf{v}_n(\mathbf{k}) \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \right]$$

из уравнений Гамильтона, $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ - локальное электрическое поле, $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ - локальное магнитное поле.

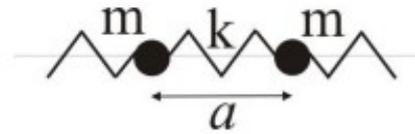
5.2 Найти волновые функции и уровни энергии стационарных состояний заряженной бесспиновой частицы в однородном магнитном поле при калибровке векторного потенциала: $A_x = 0$, $A_y = H_0 x$, $A_z = 0$. Какова кратность вырождения энергетических уровней поперечного движения частицы?

5.3 Найти волновые функции и уровни энергии стационарных состояний заряженной бесспиновой частицы в однородном магнитном поле при калибровке векторного потенциала: $A_x = -H_0 y$, $A_y = 0$, $A_z = 0$. Какова кратность вырождения энергетических уровней поперечного движения частицы?

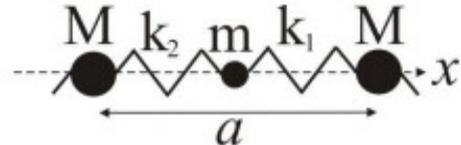
5.4 Найти волновые функции и уровни энергии стационарных состояний заряженной бесспиновой частицы в однородном магнитном поле при калибровке векторного потенциала: $\mathbf{A} = [\mathbf{H}_0 \times \mathbf{r}]/2$. Какова кратность вырождения энергетических уровней поперечного движения частицы?

Тема 6: Колебания кристаллической решетки. Фононы.

6.1 Получите закон дисперсии фононов в одномерной одноатомной цепочке атомов с массой m периодом a и с взаимодействием только между ближайшими соседями, описываемом коэффициентом упругости k .



6.2 Получите закон дисперсии фононов в одномерной двухатомной цепочке атомов с массами m и M периодом a и с взаимодействием только между ближайшими соседями, описываемом коэффициентами упругости k_1 и k_2 .



6.3 Получить закон дисперсии фононов в одномерной одноатомной цепочке атомов с массой m периодом a со взаимодействием между m ближайшими соседями.

$$U = \sum_n \sum_{m>0} \frac{1}{2} k_m (u_n - u_{n+m})^2,$$

где u_n - смещение n -го атома в решетке.

6.4 Вычислить фононную теплоемкость кристалла.

6.5 Вычислить теплопроводность изолятора (фононную часть теплопроводности кристалла).

6.6 Вывести соотношение Бомы—Ставера для фононов в металлах, связывающее скорость Ферми v_F и скорость звука в металле c :

$$c^2 = \left(\frac{Zm}{3M} \right) v_F^2,$$

где Z - заряд иона, M - масса иона, m – масса электрона.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Превосходная подготовка без недочетов
отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с очень незначительными погрешностями
очень хорошо	В целом хорошая подготовка с некоторыми ошибками
хорошо	Хорошая подготовка, но с рядом заметных ошибок
удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям
неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения

Оценка	Критерии оценивания
	испытания
плохо	Подготовка совершенно недостаточная

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

Основная литература:

1. Займан Д. М. Принципы теории твердого тела = Principles of the Theory of Solids : пер. со 2-го англ. изд. / под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. - М. : Мир, 1974. - 472 с. : с черт. - 2.21., 69 экз.
2. Основы теории металлов / Абрикосов А.А. - Москва : Физматлит, 2010., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=636103&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. 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):

-

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 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Самохвалов Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук.

Рецензент(ы): Мельников Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Бакунов Михаил Иванович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 года, протокол № 09/23.