

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
«14» декабря 2021 г. № 4

Рабочая программа дисциплины

Физика конденсированного состояния
(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования
Бакалавриат
(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность
03.03.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы
Фундаментальная радиофизика
(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)
Бакалавр
(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения
Очная
(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

20__

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Данная дисциплина относится к вариативной части ОПОП и обязательна для освоения в 7 семестре.

Цель освоения дисциплины состоит в формировании у студента целостной системы знаний по основам физики конденсированного состояния, выработке навыков построения физических моделей и решения физических задач. Дисциплина является фундаментом для последующего изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-2 Способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии	З1 (ПК-2) Знать современные образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области физики конденсированного состояния. У1 (ПК-2) Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области физики конденсированного состояния, используя современные образовательные и информационные технологии. В1 (ПК-2) Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области физики конденсированного состояния с использованием современных образовательных и информационных технологий.
ПК-1 Способность понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования	З1 (ПК-1) Знать основные принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования У1 (ПК-1) Уметь использовать на практике принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования В1 (ПК-1) Владеть опытом работы на современной радиоэлектронной и оптической аппаратуре и оборудовании

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единиц, всего 144 часа, из которых 50 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа - занятия лекционного типа, 16 часа - практические занятия, 2 часа – контрольные

самостоятельные работы), 45 часов - экзамен, 49 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	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	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Теория Друде и Зоммерфельда	31	9	4		13	18
2. Кристаллическая решетка	9	5	2		7	2
3. Основы зонной теории	21	7	5		12	9
4. Квазиклассическая модель	18	4	2		6	12
5. Фононы	12	5	3		8	4
6. Магнитные свойства	6	2			2	4
В т. ч. текущий контроль	2		2		2	
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала и диалогичная форма проведения занятий.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

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.

Примеры контрольных заданий:

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

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 $1 : 2$ ($a \times 2a$).

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 .

2.5 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 не взаимодействующих электронов. Рассмотреть случаи одномерного, двумерного и трехмерного движения электронов.

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.

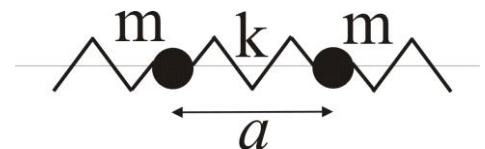
4.2 Пользуясь приближением слабой связи, найти зонный спектр для электрона в одномерной решетке с потенциалом $U(x) = U_0[3 + 2\cos(2\pi x/a)]$, ($U_0 \ll 1$).

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

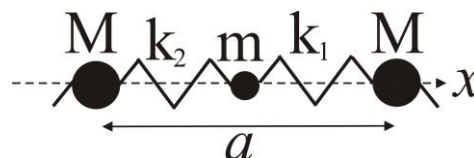
4.4 Используя приближение сильной связи для описания электронов в простой кубической (ПК) решетке с периодом a и функции s типа в качестве электронных атомных волновых функций, найти дисперсионную зависимость энергии $\varepsilon(k)$ от волнового числа k для нижней разрешенной зоны. Показать, что изоэнергетические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

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?

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 .



Примерный список домашних заданий:

1. Определить объем в импульсном пространстве, который приходится на 1 состояние газа свободных и независимых электронов в объеме $V = L * L * L$. Определить радиус сферы Ферми k_F и уровень Ферми ε_F газа свободных и независимых электронов с концентрацией $n = N/V$ (N - число электронов в объеме V).
2. Показать, что при $T = 0$ химический потенциал μ вырожденного газа свободных и независимых электронов совпадает с уровнем Ферми ε_F .
3. Вычислить среднюю энергию газа свободных и независимых электронов с концентрацией $n = N/V$ (N - число электронов в объеме) при $T = 0$.
4. Вычислить плотность состояний $g(\varepsilon)$ для системы свободных и независимых электронов в случае одномерного, двумерного и трехмерного движения электронов.
5. 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) $\vec{a}_1 = a \vec{x}_0$, $\vec{a}_2 = a \vec{y}_0$, $\vec{a}_3 = a \vec{z}_0$;
 (ОЦК) $\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(\vec{y}_0 + \vec{z}_0 - \vec{x}_0)$, $\vec{a}_2 = \frac{a}{2}(\vec{z}_0 + \vec{x}_0 - \vec{y}_0)$, $\vec{a}_3 = \frac{a}{2}(\vec{x}_0 + \vec{y}_0 - \vec{z}_0)$;
 (ГЦК) $\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(\vec{y}_0 + \vec{z}_0)$, $\vec{a}_2 = \frac{a}{2}(\vec{z}_0 + \vec{x}_0)$, $\vec{a}_3 = \frac{a}{2}(\vec{x}_0 + \vec{y}_0)$;
 где a - постоянная кристаллической решетки.
6. 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.
7. Определить температурную зависимость химического потенциала $\mu(T)$ вырожденного газа свободных невзаимодействующих электронов с фиксированным числом частиц,
8. Определить температурную зависимость средней энергии газа вырожденного газа свободных и независимых электронов в расчете на одну частицу.
9. Вычислите удельную теплоемкость газа при постоянном объеме c_v для системы свободных невзаимодействующих электронов при низких температурах.

Литература:

Задачи по физике твердого тела, под ред. Г.Дж. Голдсмида, М.: "Наука", 1976г.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования приведено в приложении 1.

6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способность студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой), решении задачи (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

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

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются: индивидуальное собеседование (ПК - 1, 2), домашние задания (ПК - 2), контрольные работы (ПК - 1) и разноуровневые задачи и задания (ПК - 1).

Для оценивания результатов обучения в виде умений используются: индивидуальное собеседование (ПК – 1, 2), практические контрольные задания и разноуровневые задачи и задания, включающие задачи реконструктивного уровня (ПК – 1).

Для оценивания результатов обучения в виде владений используются: индивидуальное собеседование (ПК – 1, 2), комплексные практические задания (ПК – 1).

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

ТЕОРИЯ МЕТАЛЛОВ ДРУДЕ И ЗОММЕРФЕЛЬДА

1. Основные положения, лежащие в основе теории металлов. Концепция модели свободных электронов, длина свободного пробега.
2. Статическая электропроводность металлов.
3. Высокочастотная проводимость металлов. Продольные и поперечные волны в твердотельной плазме.
4. Эффект Холла, постоянная Холла.
5. Тензор проводимости металла в магнитном поле.
6. Нормальный скин-эффект. Поверхностный импеданс металлов. Аномальный скин-эффект.
7. Электронная теплопроводность металлов в модели Друде. Закон Видемана-Франца.
8. Распределения Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака, и Бозе-Эйнштейна.
9. Фермионы и бозоны, принцип запрета Паули
10. Свойства вырожденного Ферми газ при $T=0$ (поверхность, скорость, импульс и энергия Ферми).
11. Граничное условие Борна-Кармана.
12. Понятие плотности состояний (энергетических уровней). Плотность состояний для свободных и невзаимодействующих электронов в 1D, 2D и 3D случаях;
13. Понятие химического потенциала. Температурная зависимость химического потенциала.
14. Теория проводимости в модели Зоммерфельда.
15. Теплопроводность и теплоемкость в модели Зоммерфельда.
16. Недостатки модели свободных электронов.
17. Адиабатическое приближение. Приближение Борна-Оппенгеймера.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

18. Элементы симметрии кристаллической решетки.
19. Дифракция рентгеновского излучения в кристаллах. Условие дифракции Брэгга-Вульфа.
20. Понятие о решетке Бравэ (элементарная ячейка, условно-элементарная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца).
21. Вид и базисы простейших решеток: ПК – простая кубическая; ОЦК – объемно-центрированная кубическая; ГЦК – гранецентрированная кубическая.
22. Обратная решетка (определение и свойства). Вектора обратной решетки.

Ячейка Бриллюэна.

23. Понятие атомной плоскости. Индексы Миллера.

24. Условие дифракции Лауэ. Эквивалентность условий дифракции Брэгга-Вульфа и Лауэ.

ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

25. Уравнение Шредингера для электрона в периодическом потенциале.

26. Теорема Блоха. Доказательство теоремы Блоха.

27. Обобщенное граничное условие Борна-Кармана для периодического потенциала.

28. Зоны Бриллюэна и энергетические зоны. Энергетическая щель.

29. Заполнение энергетических зон электронами. Металлы. Диэлектрики. Полупроводники.

30. Приближение слабого периодического потенциала. (Модель слабой связи).

31. Модель Кронига-Пенни.

32. Метод сильной связи для расчета зонной структуры. Функции Ванье.

КВАЗИКЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ

33. Основные положения квазиклассической модели. Электроны как волновые пакеты.

34. Движение в постоянных электрическом и магнитном полях. Типы траекторий.

35. Электроны и дырки.

36. Квантование орбит электрона во внешнем постоянном магнитном поле.

Уровни Ландау

37. Эффективная и циклотронная массы электрона.

38. Неравновесная и равновесная функции распределения электронов.

39. Кинетическое уравнение. Интеграл столкновений. Приближение времени релаксации.

40. Статическая электропроводность в полуклассической модели.

КОЛЕБАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ. ФОНОНЫ

41. Недостатки модели статической решетки.

42. Динамика решетки. Гармоническое приближение.

43. Нормальные моды одномерной монокристаллической решетки Браве.

44. Нормальные моды одномерной решетки с базисом.

45. Акустические и оптические моды колебаний решетки.

46. Квантовая теория колебаний решетки. Фононы.

47. Законы дисперсии акустических и оптических фононов при малых k .

48. Закон дисперсии акустических фононов при малых k . Соотношение Боме-Ставера.

49. Теплоемкость металлов. Закон Дюлонга и Пти.

50. Квантовая теория теплоемкости.

51. Теплоемкость. Интерполяционная формула Дебая.

52. Теплоемкость. Приближение Эйнштейна.

53. Электронная теплоемкость.

54. Ангармонизм колебаний решетки. Тепловое расширение твердых тел.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА.

55. Диамагнетизм Ландау.

56. Парамагнетизм Паули.
57. Сверхпроводимость. Зависимость сопротивления от температуры. Эффект Мейсснера.

Типовые контрольные задания:

Для оценки сформированности компетенции ПК-1 используются контрольные задания, примеры которых приведены в пункте 5.

Полный комплект оценочных средств представлен в ФОНДЕ оценочных средств по дисциплине «Физика конденсированного состояния»

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Н. Ашкрофт, Н. Мермин, Физика твердого тела, М., Мир, 1979.
2. Д. Займан, Принципы теории твердого тела, М., Мир, 1966.
3. А. А. Абрикосов, Основы теории металлов, М., Наука, 1987.

б) дополнительная литература:

1. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, М., Наука, 1978.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.03 Радиофизика.

Автор _____ Самохвалов А.В.

Рецензент _____ Мельников А.С.

Заведующий кафедрой _____ Бакунов М.И.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «9» декабря 2021 года, протокол № 07/21