

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 ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

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)

Форма обучения
очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2023 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
2	Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина <i>Б1.В.07, физика конденсированного состояния</i> относится к части ООП направления подготовки <i>03.03.03 Радиофизика</i> , формируемой участниками образовательных отношений.

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	
ПК-1. Способен анализировать текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики.	ПК-1.1. Применяет основные методы анализа текущей научной и научно-технической литературы в области физики и радиофизики. ПК-1.2. Анализирует текущую научную и научно-техническую литературу в области физики и радиофизики.	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	Собеседование, контрольные работы

ПК-2. Способен осваивать и применять новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики.	ПК-2.1. Обладает базовыми знаниями, необходимыми для освоения новейших методов проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики. ПК-2.2. Осваивает и применяет новейшие методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики.	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	Собеседование, домашние работы
---	---	---	--------------------------------

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа	
(практические занятия / лабораторные работы)	16
самостоятельная работа	13
КСР	2

Промежуточная аттестация – экзамен/зачет	45
---	-----------

3.2. Содержание дисциплины

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	10	5	3		8	2
2. Кристаллическая решетка	11	5	3		8	3
3. Основы зонной теории	10	5	3		8	2
4. Квазиклассическая модель	11	6	3		9	2
5. Фононы	10	5	3		8	2
6. Магнитные свойства	9	6	1		7	2
В т. ч. текущий контроль	2				2	
Промежуточная аттестация – экзамен	45					

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.

На проведение практических занятий (семинарских занятий /лабораторных работ) в форме практической подготовки отводится 4 часов.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

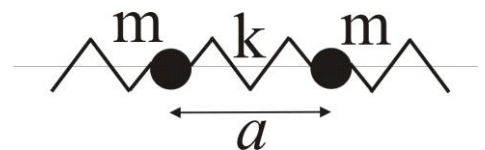
Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

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

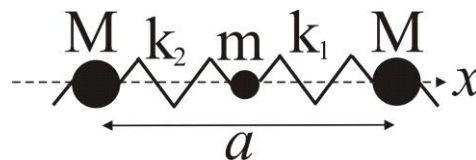
Текущий контроль усвоения материала проводится путем проведения контрольных работ во время практических занятий и проверки выполнения домашних заданий.

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 невзаимодействующих 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.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности 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 незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	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 отдельными незначительными 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 владения материалом. 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 некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми 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 оценки при промежуточной аттестации

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

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

5.2.1 Контрольные вопросы

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

потенциала.	
14. Теория проводимости в модели Зоммерфельда.	ПК-2
15. Теплопроводность и теплоемкость в модели Зоммерфельда.	ПК-1
16. Недостатки модели свободных электронов.	ПК-2
17. Адиабатическое приближение. Приближение Борна-Оппенгеймера.	ПК-1
КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА	
18. Элементы симметрии кристаллической решетки.	ПК-1
19. Дифракция рентгеновского излучения в кристаллах. Условие дифракции Брэгга-Вульфа.	ПК-2
20. Понятие о решетке Бравэ (элементарная ячейка, условно-элементарная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца).	ПК-1
21. Вид и базисы простейших решеток: ПК – простая кубическая; ОЦК – объемно-центрированная кубическая; ГЦК – гранецентрированная кубическая.	ПК-2
22. Обратная решетка (определение и свойства). Вектора обратной решетки. Ячейка Бриллюэна.	ПК-1
23. Понятие атомной плоскости. Индексы Миллера.	ПК-2
24. Условие дифракции Лауэ. Эквивалентность условий дифракции Брэгга-Вульфа и Лауэ.	ПК-1
ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ	
25. Уравнение Шредингера для электрона в периодическом потенциале.	ПК-1
26. Теорема Блоха. Доказательство теоремы Блоха.	ПК-2
27. Обобщенное граничное условие Борна-Кармана для периодического потенциала.	ПК-1
28. Зоны Бриллюэна и энергетические зоны. Энергетическая щель.	ПК-2
29. Заполнение энергетических зон электронами. Металлы. Диэлектрики. Полупроводники.	ПК-1
30. Приближение слабого периодического потенциала. (Модель слабой связи).	ПК-2
31. Модель Кронига-Пенни.	ПК-1
32. Метод сильной связи для расчета зонной структуры. Функции Ванье.	ПК-2
КВАЗИКЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ	
33. Основные положения квазиклассической модели. Электроны как волновые пакеты.	ПК-1
34. Движение в постоянных электрическом и магнитном полях. Типы траекторий.	ПК-2

35. Электроны и дырки.	ПК-1
36. Квантование орбит электрона во внешнем постоянном магнитном поле. Уровни Ландау	ПК-2
37. Эффективная и циклотронная массы электрона.	ПК-1
38. Неравновесная и равновесная функции распределения электронов.	ПК-2
39. Кинетическое уравнение. Интеграл столкновений. Приближение времени релаксации.	ПК-1
40. Статическая электропроводность в полуклассической модели.	ПК-2
КОЛЕБАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ. ФОНОНЫ	ПК-1
41. Недостатки модели статической решетки.	ПК-2
42. Динамика решетки. Гармоническое приближение.	ПК-1
43. Нормальные моды одномерной монокристаллической решетки Браве.	ПК-2
44. Нормальные моды одномерной решетки с базисом.	ПК-1
45. Акустические и оптические моды колебаний решетки.	ПК-2
46. Квантовая теория колебаний решетки. Фононы.	ПК-1
47. Законы дисперсии акустических и оптических фононов при малых k .	ПК-2
48. Закон дисперсии акустических фононов при малых k . Соотношение Бома-Ставера.	ПК-1
49. Теплоемкость металлов. Закон Дюлонга и Пти.	ПК-2
50. Квантовая теория теплоемкости.	ПК-1
51. Теплоемкость. Интерполяционная формула Дебая.	ПК-2
52. Теплоемкость. Приближение Эйнштейна.	ПК-1
53. Электронная теплоемкость.	ПК-2
54. Ангстремизм колебаний решетки. Тепловое расширение твердых тел.	ПК-1
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА.	
55. Дипольный магнетизм Ландау.	ПК-2
56. Парамагнетизм Паули.	ПК-2
57. Сверхпроводимость. Зависимость сопротивления от температуры. Эффект Мейсснера.	ПК-1

5.2.2. Типовые задачи для оценки сформированности компетенции ПК-2

3.1 Вычислить удельную проводимость металла, используя кинетическое уравнение Больцмана.

3.2 Вычислить удельную проводимость металла в слабом магнитном поле, используя кинетическое уравнение Больцмана (эффект Холла).

5.2.3. Типовые контрольные работы для оценки сформированности компетенции ПК-1
Указаны в п.4.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

2. Д. Займан, Принципы теории твердого тела, М., Мир, 1974. – 69 экз.

3. А. А. Абрикосов, Основы теории металлов, М., Наука, 2010. -

<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110976.html>

б) дополнительная литература:

1. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, М., Медиастар, 2006. – 45 экз.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и 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 – бакалавриат по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 7 августа 2020 г. N 912.

Автор (ы) Самохвалов А.В.

Рецензент (ы) Мельников А.С.

Заведующий кафедрой Бакунов М.И.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета/института

от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23.