

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

СОГЛАСОВАНО
зам. директора института
по научной работе
доктор физ.-мат. наук

 М.А. Короткин

« 01 » сентября 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ
Директор института
академик РАН

 Н.В. Мушников

« 07 » сентября 2025 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальности
1.3.8. Физика конденсированного состояния
по физико-математическим наукам

Специализация: **Теория конденсированного состояния**

Екатеринбург
2025

1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Электронные состояния.

Структура зон. Симметричные точки и симметричные направления в зоне Бриллюэна. Понятие полосы. Динамика электронов. Приближение самосогласованного поля.

Расчеты энергетических зон. Метод плоских волн, метод ОПВ, метод ППВ, метод псевдопотенциала. Структура ферми-поверхностей, их типы. Экспериментальное изучение ферми-поверхностей.

Зонная структура полупроводников и полуметаллов. Кр–метод и метод эффективной массы. Динамика электронов и дырок в полупроводниках. Полуметаллы. Бесщелевые состояния.

Зонная структура изоляторов. Приближение сильной связи. Функции Ванье.

Примесные состояния. Описание на основе приближения сильной связи. Донорные и акцепторные уровни в полупроводниках. Примесные состояния в методе теории рассеивания. Связанные состояния на примеси.

Зоны переходных металлов. Псевдопотенциал для переходных металлов. Энергетические зоны. Теория возмущений и свойства переходных металлов. Электронная структура сплавов. Приближение когерентного потенциала.

Колебания решетки и электрон-фононные взаимодействия.

Адиабатическое приближение. Динамика решетки. Динамическая матрица. Свойства колебаний решетки. Дисперсионные кривые. Спектральная плотность колебаний. Сингулярности Ван-Хова. Примесные моды.

Дифракция на идеальном кристалле. Упругое и неупругое рассеяние.

Гамильтониан электрон-фононного взаимодействия. Формализм Блоха-Фрелиха. Фононный сдвиг энергии электронных состояний и взаимодействие электронов через фононы. Коновская аномалия. Поляроны малого и большого радиусов. Переход Пайерлса в линейной цепочке.

Учет взаимодействия между электронами.

Диэлектрический формализм. Экранирование. Энергетический потери быстрых электронов. Переход Мотта. Экситон. Плазменные колебания.

Электронная ферми-жидкость. Концепция квазичастиц. Ферми-жидкостные эффекты. Модель узких зон Хаббарда. Теория кристаллического поля. Расщепление энергетических термов в кристаллическом поле. Эффект Яна-Теллера. Сверхобменное взаимодействие. Эмпирические правила Гуденафа-Канамори-Андерсона. Модель Кугеля-Хомского.

Статистические электронные свойства.

Типы твердых тел, их зонная картина: металлы и изоляторы, полупроводники и полуметаллы. Бесщелевые состояния.

Термодинамика электронов в металлах и полупроводниках. Полупроводники: собственные, n- и p-типов. Электронная теплоемкость. Полупроводниковые системы: pn-переход, туннельный диод. Магнитная восприимчивость: спиновый парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау. Диамагнитные домены. Магнитный пробой.

Статистическая восприимчивость невзаимодействующих локализованных моментов: диамагнетизм, парамагнетизм ионов переходных металлов и ионов редкоземельных элементов.

Гейзенберговский гамильтониан. Приближение самосогласованного поля. Закон Кюри-Вейсса. Переход от операторов спина к бозевским. Спиновые волны.

Антиферромагнетизм. Спиновые волны. Основное состояние антиферромагнетиков. Типы магнитных структур.

Коллективизированная модель ферромагнетизма. Стонерские и коллективные возбуждения. Sd(f)-модель. Взаимодействие Рудермана-Киттеля. Магнетизм РЗ-металлов. Проблема локализованных магнитных моментов в металлах и сплавах.

Явления переноса.

Динамические свойства магнетиков. Уравнения Блоха и Ландау-Лифшица. Времена релаксации T_1 и T_2 . Магнитный (электронный и ядерный) резонанс. Теория линейного отклика. Динамическая восприимчивость металлов. Теория ферми-жидкости и спиновые волны в неферромагнитных металлах.

Классификация явлений переноса (феноменологическое рассмотрение). Соотношение Онзагера. Особенности явлений переноса в переходных металлах, в том числе в ферромагнетиках.

Методы расчета кинетических коэффициентов. Уравнение Больцмана. Формула Кубо. Фононная часть электросопротивления. Закон Блоха. Теплопроводимость. Закон Видемана-Франца. Процессы переброса и межполосные переходы электронов. Межэлектронные соударения. Магнитная часть электросопротивления в пара- и ферромагнетиках. Рассеяние на примесях и в неупорядоченных сплавах. Остаточное электросопротивление. Правило Нордгейма, Маттиссена и причины их нарушения. Туннелирование электронов.

Гальваномагнитные, термоэлектрические и термомагнитные свойства металлов. Случаи слабых и сильных магнитных полей. Гальваномагнитные явления и топология открытых поверхностей Ферми.

Особенности явлений переноса в полупроводниках.

Высокочастотные, оптические и другие спектральные свойства.

Электромагнитные волны в присутствии магнитного поля: геликоны, магнитоплазменные волны. Поглощение звука в металлах.

Проводимость в оптическом диапазоне частот. Дисперсия и поглощение. Межзонные переходы. Фотоэлектрическая эмиссия. Магнето-оптические эффекты Фарадея и Керра.

Сверхпроводимость.

Энергия связи куперовской пары. Теория БКШ. Уравнение для щели. Температурное обобщение. Формула для T_0 . Спектр возбуждений. Канонические преобразования Боголюбова.

Незатухающий ток. Уравнение Лондонов. Волновая функция как параметр порядка.

Теория Гинзбурга-Ландау. Квантование потока. Сверхпроводники второго порядка. Теория Абрикосова. Флуктуации в сверхпроводниках.

Фазовые переходы.

Фазовые переходы второго рода. Степень упорядочения. Теория Ландау. Изменение симметрии при фазовом переходе второго рода.

Фазовый переход в двумерной решетке Изинга. Поведение термодинамических величин вблизи фазового перехода. Критические индексы. Приближение Орнштейна-Цернике для парной корреляционной функции. Критическое рассеяние. Гипотеза подобия. Результаты современной теории Вильсона (4- ϵ -разложение).

Теория дислокации и пластдеформаций.

Прямолинейные и криволинейные дислокации в теории упругости. Поле напряжений краевой и винтовой дислокации. Собственная энергия дислокации. Энергия взаимодействия дислокаций.

Пластическая деформация. Кривая напряжение-деформация. Стадии упрочнения. Теория упрочнения металла.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Теория симметрии.

Теория представления групп: характеры, соотношение ортогональности и полноты, прямое произведение представлений и разложение его на неприводимые представления. Построение базиса неприводимого представления. Неприводимые представления точечных групп.

Теорема Вигнера и классификация термов. Правила отбора для матричных элементов. Непрерывные группы.

Кристаллические системы. Кристаллические классы. Использование симметрии при исследовании макроскопических характеристик. Представление пространственных групп. Группа волнового вектора.

Методы квантовой теории поля в статистической физике.

Диаграммная техника при $T=0^\circ\text{K}$

Представление взаимодействия. Адиабатическое включение взаимодействия. S-матрица.

Причинная функция Грина. Определение функции Грина свободных частиц. Аналитические свойства. Физический смысл полюсов.

Основные принципы диаграммной техники. Теорема Вика. Диаграммы Фейнмана. Теорема о связных диаграммах.

Диаграммная техника для различных типов взаимодействий: двухчастичного, электрон-фононного, взаимодействия с внешним полем. Структура диаграммных рядов. Уравнение Дайсона. Собственно-энергетическая часть. Вершинная часть. Двухчастичная функция Грина.

Лестничное приближение. Уравнение для амплитуды рассеяния в газовом приближении.

Приближение высокой плотности. Суммирование поляризационных петель. Эффективное экранированное взаимодействие электронов. Поляризационный оператор. Плазменные колебания как связанное состояние электрона и дырки.

Диаграммная техника при конечных температурах

Моцубаровские функции Грина. Функции Грина свободных частиц. Теория возмущений. Теорема Вика.

Диаграммная техника для различного типа взаимодействий в координатном и импульсном пространстве. Суммирование по частотам. Уравнение Дайсона. Двухчастичные функции Грина. Вершинная часть.

Ряд теории возмущений для термодинамического потенциала. Теорема о связанных диаграммах.

Спектральные представления. Связь с запаздывающей двухвременной функцией Грина.

Применение к теории сверхпроводимости. Уравнения Горькова. Аномальные функции Грина. Матричная запись системы уравнений для функции Грина.

Запаздывающие и опережающие функции Грина

Двухвременные функции Грина по Боголюбову. Связь корреляционной функции со спектральной плотностью. Цепочки гриновских функций и их обрыв. Приложение к электрон-фононному взаимодействию, ферромагнетизму и сверхпроводимости.

Литература

1. **Абрикосов А.А.**
Введение в теорию нормальных металлов. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. - 288 с.: ил.
2. **Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е.**
Методы квантовой теории поля в статистической физике. - М.: Физматгиз, 1962. - 443 с.: ил.
3. **Булаевский Л Н "Структурный (пайерлсовский) переход в квазиодномерных кристаллах" УФН 115 263–300 (1975)** (см. также лекции «Коуровка -13»).
4. **Вонсовский Сергей Васильевич**
Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.

5. **Джонс Г.**
Теория зон Бриллюэна и электронные состояния в кристаллах/ Пер. с англ.; Под ред. В.Л. Бонч-Бруевича. - М.: Мир, 1968. - 264 с.: ил.
6. **Жен П.Ж.**
Сверхпроводимость металлов и сплавов/ Пер. с англ.А.И.Русинова; Под ред. Л.П.Горькова. - М.: Мир, 1968. - 280с.
7. **Займан Джон М.**
Принципы теории твердого тела/ Пер. со 2-го англ.изд.; Под ред. В.Л.Бонч-Бруевича. - М.: Мир, 1974. - 472 с.: ил.
8. **Зубарев Д. Н.**
Двухвременные функции Грина в статистической физике, УФН, 71:1 (1960), 71–116; Phys. Usp., 3:3 (1960), 320–345
9. **Каллуэй Дж.**
Теория энергетической зонной структуры/ Пер. с англ. В.П.Широковского; Под ред. С.В.Вонсовского. - М.: Мир, 1969. - 360с.
10. **Киттель Чарльз**
Квантовая теория твердых тел/ Пер. с англ. А.А.Гусева. - М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1967. - 491 с.: ил.
11. **Ландау Л.Д.,Лифшиц Е.М.**
Теоретическая физика: Учеб. пособие для физ.спец.ун-тов.-Изд.3-е, перераб.и доп.- Т.3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория.- М.: Наука, 1974. - 752 с.: ил.
12. **Ландау Л.Д.,Лифшиц Е.М.**
Теоретическая физика: Учеб. пособие для физ.спец. ун-тов. - Изд.3-е,доп. - Т.5. Ч.1: Статистическая физика. - М.: Наука, 1976. - 584 с.: ил.
13. **Марадудин А., Монтролл Э., Вейсс Дж.**
Динамическая теория кристаллической решетки в гармоническом приближении/ Пер. с англ. И.В.Абаренкова и Е.Д.Трифорова; Под ред. М.И.Петрашень. - М.: Мир, 1965. - 383 с.: ил.
14. **Марч Н., Янг У., Сампантхар С.**
**Проблема многих тел в квантовой механике/ Пер. с англ. А.Г. Башкирова и Ю.Г.Рудского; Под ред. Д.Н.Зубарева и Н.М.Плакиды . - М.: Мир, 1969. - 496 с. : ил. - Библиогр.: с.483-487.
Доп. титул. л. : he many-body problem in quantum mechanics / N.H.March, W.Yong, S.Sampanthar (Cambridge at the university press,1967)**
15. **Маттис Даниель К.**
Теория магнетизма: Введение в изучение кооперативных явлений /

Пер.с англ.Под ред.И.М. Лифшица и М.И.Каганова.- М.: Мир, 1967.
- 407 с.: ил. –

16. **Нокс Р.С.,Голд А.**

Симметрия в твердом теле/Пер.с англ.Под ред.В.Л.Бонч-Бруевича.- М.: Наука, 1970. - 424 с.: ил.

17. **Стенли Г.**

Фазовые переходы и критические явления/ Пер.с англ.А.И.Мицека и Т.С.Шубиной; Под ред. С.В.Вонсовского. - М.: Мир, 1973. - 473 с. : ил.
- Библиогр.: с.390-401.

Пер.изд.: Introduction to phase transitions and critical phenomena / Н. Eugene Stanley (Oxford, 1971)

18. **Уайт Р.М.**

Квантовая теория магнетизма/ Пер.с англ.М.П.Кемоклидзе и М.А.Либермана; Под ред.А.С.Боровика-Романова и Л.П.Питаевского. - М.: Мир, 1972. - 306 с.: ил.

19. **Физика металлов/ Под ред. Дж.Займана; Пер. с англ.**

Л.С.Варшавской; Под ред. М.Я.Азбеля. - Т.1. - М.: Мир, 1972. - 464 с.: ил.

20. **Фудзита С.**

Введение в неравновесную квантовую статистическую механику / Пер. с англ. А.Г.Башкирова; Под ред. Д.Н.Зубарева и Н.М. Плакиды. - М.: Мир, 1969. - 207 с. : ил. - Библиогр.: с. 196-201.

Доп. титул. л. : Introduction to non-equilibrium quantum statistical mechanics / Shigeji Fujita (W.B.Saunders CO., 1966)

21. **Харрисон У.**

Теория твердого тела/ Пер.с англ.Г.Л.Краско; Под ред.Р.А. Суриса. - М.: Мир, 1972. - 616 с.: черт.

22. **Хирт Дж.П.,Лоте И.**

Теория дислокаций/ Пер.с англ.; Под ред.Э.М.Нагорного и Ю.А.Осипьяна. - М.: Атомиздат, 1972. - 599с.:ил. - Библиогр.:с.565-583.

23. **Хоникомб Р.**

Пластическая деформация металлов/ Пер. с англ.; Под ред. Б.Я.Любова. - М.: Мир, 1972. - 408 с.:ил.