

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



УТВЕРЖДАЮ
Директор института
академик РАН

 М.А. Короткин

 Н.В. Мушников

« 01 » сентября 2025 г.

« 02 » сентября 2025 г.

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

Специализация: **Физические свойства полупроводников**

Екатеринбург
2025

1. Силы связи и типы твердых тел.

Электронная конфигурация атомов. Типы химической связи: ионная ковалентная, металлическая, ван-дер-ваальсовская связь. Ионные кристаллы, ковалентные кристаллы, кристаллы со смешанными связями, некристаллические полупроводники: аморфные, жидкие, стеклообразные. Запрещенная зона энергий. Полупроводниковые свойства и химическая связь, полупроводники с малой подвижностью.

2. Элементы симметрии в кристалле.

Точечные группы, трансляционные группы (решетки Браве), пространственные группы. неприводимые представления точечных и пространственных групп. Характеры представлений. Соотношения ортогональности. Параметры конкретных структур кристаллов (алмаз, цинковая обманка, полуметаллы 5 группы, соединения 2-6).

3. Колебания атомов кристаллической решетки.

Колебания атомов кристаллической решетки, гармоническое приближение (малые колебания). Коллективные координаты и фононы. Акустические и оптические фононы. Законы дисперсии для оптических и акустических ветвей колебаний.

Фононная часть теплоемкости. Характеристические температуры Дебая. Ангармонизм и фонон-фононное взаимодействие. Теплопроводность и тепловое расширение.

Экспериментальные методы исследования фононного спектра твердых тел.

4. Электронный энергетический спектр твердых тел.

Адиабатическое и одноэлектронное приближение. Теорема Блоха и волновые функции электрона в кристалле, квазиимпульс. Зона Бриллюэна, ее симметрия (характерные точки и линии симметрии). Общие свойства симметрии функции $\varepsilon(\vec{k})$ - закона дисперсии электронов. Звезда волнового вектора.

вырождение спектра, обусловленное симметрией. Теорема Вигнера. Правила отбора, метод сильной связи, энергетические зоны в приближении почти свободных электронов. Заполнение энергетических зон электронами при $T=0$. Критерий металла и диэлектрика.

Полуметаллы и бесщелевые полупроводники. Поверхность Ферми. Геометрия поверхностей Ферми в металлах.

5. Зонная структура полупроводников, размерные эффекты.

Характер химической связи полупроводников 4 группы, соединений III-V и II-V. Актуальные и дополнительные экстремумы в спектре, квадратичное приближение для закона дисперсии (простые и вырожденные экстремумы). Эффективная масса - характеристика закона дисперсии. Связь эффективной массы с параметрами K_r - приближения. Узкощелевые полупроводники и неквадратичный закон дисперсии (теория Кейна). Зависимость эффективной массы от энергии. Вид плотности состояний.

Размерное квантование энергии электронов. Условия наблюдения квантоворазмерных эффектов. Структуры с низкоразмерным электронным газом. Сверхрешетки.

Метод эффективной массы (движение электрона в возмущенном периодическом поле), связанные состояния электрона на кулоновском центре (мелкие примесные уровни) и на дырке (экситоны). Электрон в магнитном поле. Квантование Ландау, циклотронная масса, плотность состояний.

6. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.

Функция Ферми, критерий вырождения. Электронная теплоемкость, собственные, примесные и компенсированные полупроводники, промежуточное вырождение и классическая статистика.

Плотность состояний в электронных системах с пониженной размерностью. Статистика носителей в низкоразмерных структурах. Переход от дискретного к непрерывному спектру в направлении квантования для систем различной

размерности. Квази- низкоразмерные системы. Экранирование 2D, 3D случай. Водородоподобный атом, экситон в 3D, 2D, 1D случае.

7. Явления переноса в постоянных полях.

Кинетическое уравнение Больцмана. Полевая часть - возмущение электрическим, магнитным и тепловым полем. Интеграл столкновений. Взаимодействие электронов со статическими дефектами и с фононами. Приближение времени релаксации τ .

Феноменологическое определение гальвано- и термомагнитных эффектов (электропроводность, теплопроводность, термоэдс, магнитосопротивление, эффекты Холла и Нернста-Эттиннсгаузена).

Метод вычисления этих эффектов на основе уравнения Больцмана. Температурные зависимости сопротивления в металлах и подвижности в полупроводниках, Гальваномагнитные эффекты как метод изучения анизотропии поверхности Ферми в металлах и анизотропии изоэнергетических поверхностей в полупроводниках. Термомагнитные эффекты как метод исследования закона рассеяния в полупроводниках. Квантовые осцилляции кинетических коэффициентов в сильных магнитных полях (Шубникова-де Гааза, магнитофононные). методы определения эффективной массы и концентрация электронов в полупроводниках и исследования сечений поверхностей Ферми в металлах.

Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Метрологические применения квантового эффекта Холла. Роль экранирования и крупномасштабных флуктуаций потенциала в Квантовом эффекте Холла. Квантовые интерференционные поправки к проводимости.

8. Нелинейные явления в сильных электрических полях.

Разогрев электронного газа. Уравнение баланса. Электронная температура. Роль неупругости рассеяния. Виды вольтамперных характеристик в сильных электрических полях. Отрицательное дифференциальное сопротивление и

эффект Ганна.

9. Оптические свойства.

Поглощение свободным носителями. Нормальный и аномальный скин-эффект. Плазменные колебания и минимум коэффициента отражения. Циклотронный резонанс в полупроводниках металлах. Межзонные переходы - собственное поглощение. Прямые и не прямые, запрещенные и разрешенные переходы. Определение ширины запрещенной зоны из эксперимента. Эффекты магнитопоглощения в квантовых полях. Эффект Фарадея.

10. Электронные фазовые переходы.

Влияние внешних воздействий (давления, магнитного поля, температуры) на зонную картину. Бесщелевые полупроводники и полуметаллы. Полумагнитные полупроводники. Легированные полупроводники. Структура электронного спектра в запрещенной зоне, связанная с наличием мелких примесей центров. Образование примесной зоны. Переход Мотта-Хаббарда. Возникновение хвоста плотности состояний в сильно легированных полупроводниках (модель Кейна, Келдыша, Бонч-Бруевича). Механизмы проводимости по примесям (появление энергии активации, экспоненциальная зависимость проводимости от концентрации, закон Мотта в перескоковой проводимости, роль компенсации).

11. Экспериментальные методы определения основных характеристик твердых тел.

Концентрация, подвижность, эффективная масса, g-фактор, времена релаксации энергии и импульса (как функции квазиимпульса) носителей заряда, ширина запрещенной зоны, энергия основного состояния изолированной примеси.

Литература

1. **Ляпилин И. И., Цидильковский И. М.**
Узкощелевые полумагнитные полупроводники //Успехи физических наук. – 1985. – Т. 146. – №. 5. – С. 35-72.
2. **Ансельм А.И.**
Введение в теорию полупроводников: Учеб.пособие для физ.спец.вузов. - Изд.2-е, доп. перераб. - М.: Наука, 1978. - 615 с.: ил.
3. **Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Калашников Сергей Григорьевич**
Физика полупроводников: Учеб. пособие для вузов. - М.: Наука, 1977. - 672 с.: ил.
4. **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.
5. **Цидильковский Исаак Михайлович**
Зонная структура полупроводников. - М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1978. - 328 с.: черт. - Библиогр.: с.314-328.
6. **Цидильковский** **И.М.**
Электроны и дырки в полупроводниках. Энергетический спектр и динамика. - М.: Наука, 1972. - 640 с.: черт.
7. **Брандт** **Н.Б.,** **Чудинов** **С.М.**
Электронная структура металлов: Учеб. пособие для физ. специальностей вузов – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. - 332 с. : ил.
8. **Блатт Ф.**
Физика электронной проводимости в твердых телах/ Пер. с англ. Г.Л.Краско и Р.А.Суриса. - М.: Мир, 1971. - 470с.
9. **Мотт** **Нэвилл** **Фрэнсис,** **Дэвис** **Эдвард** **Артур**
Электронные процессы в некристаллических веществах: В 2-х т./ Пер. с англ. под ред. Б.Т.Коломийца. - 2-е перераб. и доп изд. - Т.1. - М.: Мир, 1982. - 368 с.: ил.
10. **Харрисон У.**

- Теория твердого тела/ Пер.с англ.Г.Л.Краско; Под ред.Р.А. Суриса.**
- М.: Мир, 1972. - 616 с.: черт.
11. **Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.**
Электронные свойства легированных полупроводников. - М.:
Наука.Гл.ред.физ.-мат.лит.. 1979. - 416с. - (Физика)
12. **Конуэлл Э.**
Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях/ Пер. с англ. А.Ф.Волкова и А.Я.Шульмана; Под ред. И.Б.Левинсона и Ю.К.Пожелы. - М.: Мир, 1970. - 384с.:черт.
13. **Блекмор Дж.**
Статика электронов в полупроводниках/ Пер. с англ. под ред. Л.Л.Коренблита. - М.: Мир, 1964. - 392с.
14. **А.Я. Шик, Л.Г. Бакуев, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. Физика низкоразмерных систем.** - СПб., 2001.
15. **В.А. Кульбачинский Физика наносистем.** - Москва, Физматлит, 2023.
16. **Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. Электронные свойства двумерных систем.** - М. Мир 1982.
17. **В.Ф. Гантмахер Электроны в неупорядоченных средах.** - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
18. **Квантовый эффект Холла / Под редакцией Р.Пренджа, С. Гирвина.** М.: Мир, 1989.