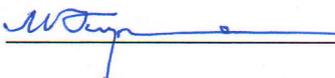


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

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

 М.А. Коротин

« 01 » сентября 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ
Директор института
академик РАН

 Н.В. Мушников

« 02 » сентября 2025 г.

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

Специализация: **Электронные явления при низких температурах**

Екатеринбург
2025

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электронные энергетические спектры и поверхности Ферми веществ с металлическим типом проводимости.

Система валентных электронов. Поверхность Ферми. Закон дисперсии. Основные характеристики электронной системы металла (фермиевская скорость, эффективные массы, площади поверхности Ферми и её сечений, плотность состояний). Связь между электронными характеристиками и физическими свойствами (электропроводностью, термоэдс, электронной теплоёмкостью, парамагнитной восприимчивостью и др.).

Особенности движения электрона в кристаллической решётке. Трансляционная симметрия. Ячейки Браве и Вигнера-Зейтца. Обратное пространство и зоны Бриллюэна. Построение и вид зон Бриллюэна для ОЦК, ГЦК и ГПУ-решёток. Заполнение зон электронами.

Построение поверхности Ферми по электронному спектру. Геометрия изоэнергетических поверхностей в металлах и их классификация.

Фаза Берри в физике конденсированного состояния. Её аналогия в геометрии. Связность и кривизна Берри. Число Черна. Топологические изоляторы и полуметаллы, особенность их электронной структуры. Связь между внутренним аномальным эффектом Холла и кривизной Берри, аномальная скорость блоховского электрона.

Уровни Ландау для квадратичного и линейного закона дисперсии. Слабая локализация и антилокализация в топологических изоляторах. Уравнение Хиками-Ларкина-Нагаоки.

Электропроводность металлов.

Феноменологические соотношения. Тензор проводимости. Электропроводность в данном направлении. Связь электропроводности со структурой энергетического спектра. Формула И.М. Лифшица.

Температурная зависимость электропроводности металлов. Механизмы

рассеяния электронов проводимости. Рассеяние электронов на примесях, вакансиях, дислокациях. Электрон-фононное рассеяние. Межэлектронные столкновения.

Взаимодействие электронов проводимости с поверхностью металла. Размерный эффект в электросопротивлении. Характер отражения электронов проводимости от поверхности кристалла.

Аттестация электрической чистоты металлических кристаллов методом остаточного электросопротивления.

Теплоемкость металлов.

Электронная теплоёмкость; связь с плотностью состояний. Решеточная теплоемкость. Другие вклады в теплоемкость. Теплоёмкость магнитоупорядоченных веществ. Теплоемкость слоистых структур.

Теплопроводность металлов.

Электронная и решеточная составляющие теплопроводности. Закон Видемана-Френца. Термоэдс металлов.

Сверхпроводимость.

Характер фазового перехода металл-сверхпроводник. Эффект Мейснера. Критическая температура, критическое магнитное поле, критический ток. Уравнение Лондонов. Глубина проникновения. Длина когерентности. Сверхпроводники первого и второго рода. Магнитные свойства сверхпроводников второго рода. Основные положения теории Бардина-Купера-Шриффера. Энергия возбуждённых состояний сверхпроводника и энергетическая щель. Выражение для температуры перехода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Методы получения и регулирования низких и сверхнизких температур.

Физические принципы сжижения газов. Получение низких температур откачкой газов. Диффузионные, сорбционные и конденсационные насосы. Методы стабилизации и регулирования температуры. Криостаты. Методы получения сверхнизких температур. Адиабатическое размагничивание солей и ядерное размагничивание. Криостаты растворения гелия-три в гелии-четыре.

Термометрия.

Абсолютная термодинамическая шкала Кельвина. Международная шкала температур. Реперные точки. Газовый термометр. Термометры сопротивления (угольные, германиевые, платиновые; температурные диапазоны применения, погрешности измерений). Термопара. Магнитная термометрия.

Методы измерения электропроводности.

Потенциометрические методы. Бесконтактные методы измерений. Модуляционные сверхпроводящие методики.

Тепловые методы исследований.

Измерение теплоемкости. Адиабатические калориметры. Метод температурных волн. Измерение теплопроводности. Измерение теплового расширения. Дилатометры.

Методы получения магнитных полей.

Методы получения постоянных магнитных полей. Электромагниты. Соленоиды. Сверхпроводящие соленоиды. Магнит Биттера. Методы получения импульсных магнитных полей. Регулирование и стабилизация магнитного поля. Способы компенсации магнитного поля. Система Гельмгольца, корректирующие катушки.

Методы измерения магнитных свойств.

Исследование парамагнитных и магнитоупорядоченных веществ. Методики измерений магнитной восприимчивости (индукционные, механические). Метод Фарадея; метод Гюи. Измерение намагниченности. Измерения в импульсных магнитных полях.

Методы исследования электронной структуры, основанные на квазиклассическом движении электронов в магнитном поле.

Уравнение движения электрона в магнитном поле. Траектории движения электрона в обратном и реальном пространствах. Гальваномагнитные явления. Понятие об эффективном магнитном поле, эффекты в слабых магнитных полях. Гальваномагнитные явления в сильных «Эффективных» магнитных полях. Магнитосопротивление. Эффект Холла. Гальваномагнитный тензор. Связь гальваномагнитных явлений с топологией поверхности Ферми. Методики измерений гальваномагнитных эффектов. Термоэлектрические эффекты в сильных магнитных полях: термоэдс и эффект Нернста-Эттингсгаузена. Связь с геометрией поверхности Ферми. Экспериментальные методики измерений термоэлектрических свойств. Циклотронный резонанс. Условия наблюдения. Особенности метода. Получаемая информация. Радиочастотный размерный эффект. Условия наблюдения. Получаемая информация о поверхности Ферми (величина фермиевых импульсов, сечения поверхности Ферми, температурная зависимость частоты столкновений электронов проводимости). Эффект электронной фокусировки. Получаемая информация о фермиевских импульсах и характере отражения носителей от поверхности кристалла.

Методы фермиологии, основанные на квантовых эффектах в магнитном поле.

Квантование энергии в магнитном поле. Уровни Ландау. Спиновое расщепление уровней. Плотность состояния в квантованном спектре. Влияние температуры и рассеяния носителей тока. Эффекты де Гааза-ван Альфена и Шубникова-де Гааза. Условия наблюдения. Получаемая информация (величины

площадей экстремальных сечений поверхности Ферми, эффективных масс носителей, температур Дингла, времени релаксации). Измерение g-фактора электронов проводимости методом эффекта де Гааза-ван Альфена. Магнитоакустические эффекты. Магнито-акустический размерный эффект. Эффект квантовых осцилляций поглощения ультразвука. Магнитоакустический циклотронный резонанс. Условия наблюдения и получаемая информация. Эффект магнитного пробоя.

Экспериментальные методы определения фазы Берри. Фаза Берри и квантовые осцилляции. Формула Лифшица-Косевича, фазовый фактор. Экспериментальный метод определения фазы квантовых осцилляций, верная диаграмма уровней Ландау.

Основная литература

1. **Брандт Н.Б., Чудинов С.М.**
Электронная структура металлов : [Учеб. пособие для физ. специальностей вузов] - Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1973. - 332 с. : ил.; 22 см.
2. **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.
3. **Киттель Чарльз**
Введение в физику твердого тела/ Пер. с 4-го амер. изд. А.А.Гусева и А.В.Пахнева; Под общ.ред.А.А.Гусева. - М.: Наука, 1978. - 791 с.: ил.
4. **Уайт Г.К.**
Экспериментальная техника в физике низких температур: Справочн.руководство/ Пер. с англ. под ред. А.И.Шальникова. - М.: Физматгиз, 1961. - 368с.:ил.

Дополнительная литература

1. **Ашкрофт Н.У., Мермин Н.Д.**
Физика твердого тела: В 2-х т./ Пер. с англ. А.С.Михайлова; Под

- ред.М.И.Каганова.- Т.1. - М.: Мир, 1979. - 399 с.: черт. - Библиогр.в конце глав и прил.
2. Ашкрофт Н.У., Мермин Н.Д.
Физика твердого тела: В 2-х т./ Пер. с англ. А.С.Михайлова; Под ред. М.И.Каганова. - Т.2. - М.: Мир, 1979. - 422 с.: черт. - Библиогр.в конце глав и прил.
 3. Гантмахер Всеволод Феликсович, Левинсон Иошуа Бенъяминович
Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках.- М.: Наука, 1984. - 351с.:ил. - Библиогр.:с.9-10 и с.344-350.
 4. Займан Джон М.
Электроны и фононы:Теория явлений переноса в твердых телах/Пер.с англ.;Под ред.В.Л.Бонч-Бруевича. - М.: Изд-во иностр.лит., 1962. - 488 с.:ил.
 5. М. И. Каганов, И. М. Лифшиц
Электронная теория металлов и геометрия, УФН, 129:3 (1979), 487–529; Phys. Usp., 22:11 (1979), 904–927
 6. Крэкнелл А., Уонг К.
Поверхность Ферми: Понятие поверхности Ферми, ее определение и использование в физике металлов/ Пер. с англ. Г.И.Бабкина и В.А.Гаспарова; Под ред. В.Я.Кравченко. - М.: Атомиздат, 1978. - 350с.:ил.
 7. Лифшиц И.М.,Азбель М.Я., Каганов М.И.
Электронная теория металлов. - М.: Наука, 1971. - 415с.:ил.
 8. Мория Т.
Последние достижения теории магнетизма коллективизированных электронов УФН 135 117–170 (1981)
 9. Физика низких температур : Пер. с англ. / Под общ. ред. А. И. Шальникова. - Москва : Изд-во иностр. лит., 1959. - 937 с. : ил.; 28 см. Авт. глав.: Дж. Доунт, С. Коллинз, Д. Макдональд и др. Доп. тит. л.: Kältp Physik. Berlin u. a., Springer-Verl., 1956. Handbuch der Physik. Hrsh. von S. Flügge. Bd. 14-15
 - 10.Шульце Г.
Металлофизика/ Пер. с нем.А.К.Натансона; Под ред.Я.С.Уманского. - М.: Мир, 1971. - 503с.:ил.

11. **Electrons at the Fermi surface/Ed.by M.Sprigford.-** Cambridge etc.:Cambridge Univ.Press, 1980.- 541 с.:ил.- Библиогр.: с.529-541. ISBN 0-521-22337-7
12. **Kane C. L.**
Chapter 1-Topological Band Theory and the Z2 Invariant, volume 6 of Topological Insulators. – 2013.
13. **Zhao W., Wang X.**
Berry phase in quantum oscillations of topological materials //Advances in Physics: X. – 2022. – Т. 7. – №. 1. – С. 2064230.
14. **Hu J. et al.**
Transport of topological semimetals //Annual Review of Materials Research. – 2019. – Т. 49. – №. 1. – С. 207-252.