### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(МИНОБРНАУКИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(ИПРИМ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПРИМ РАН,

д.т.н. А.Н. Власов

(Приказ № от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ г.)

ОДОБРЕНО

Ученым советом ИПРИМ РАН

(Протокол № от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ г.)

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В АСПИРАНТУРУ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

**1.3.8 Физика конденсированного состояния**

Москва 2022

Вступительное испытание проводится в форме собеседования. Собеседование состоит из двух частей:

* собеседование по содержанию выпускной квалификационной работы, выполненной поступающим при окончании специалитета или магистратуры – в соответствии с частью I настоящей Программы;
* собеседование по общетеоретическим вопросам выбранной направленности обучения – в соответствии с частью II настоящей Программы.

**ЧАСТЬ I**

Вопросы по выпускной квалификационной работе поступающего

(магистратура или специалитет)

1. Основные положения.
2. Новизна.
3. Актуальность.

**ЧАСТЬ II**

1. **Силы связи в твердых телах**

Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.

Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным

взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO3.

Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

2. **Симметрия твердых тел**

Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера - Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.

Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

3. **Дефекты в твердых телах**

Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.

Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

4**. Дифракция в кристаллах**

Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

# 5. **Энергетический спектр кристаллов**

Описание энергетического состояния кристаллов при помощи газа квазичастиц. Примеры квазичастиц: фононы, магноны, экситоны, плазмоны и другие. Электроны в металле как квазичастицы, квазиимпульс. Закон дисперсии. Теорема Блоха. Граничные условия. Плотность состояний. Статистика газа квазичастиц. Бозоны и фермионы. Взаимодействие квазичастиц.

Колебания решётки – фононы. Акустическая и оптическая ветви колебаний. Теплоёмкость решётки. Дебаевская частота. Фактор Дебая-Уоллера в рассеянии рентгеновских лучей. Ангармонизм и тепловое расширение.

Электронные состояния в кристаллах. Приближение сильной и слабой связи. Зонная схема и типы твердых тел. Вырожденный электронный газ. Электронная теплоемкость, поверхности Ферми. Тензор эффективных масс. Электроны и дырки. Циклотронная масса. Положение Ферми-уровня в невырожденных полупроводниках.

# **Кинетические явления**

Кинетическое уравнение. Электро- и теплопроводность. Время релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефектах. Электрон- фононные взаимодействия. Нормальные процессы и процессы переброса. Магнитосопротивление и эффект Холла.

Металлы с большой длиной свободного пробега электронов. Аномальный скин- эффект. Циклотронный резонанс и размерные эффекты. Проникновение электромагнитного поля в металл. Квантование орбит в магнитном поле. Эффект де- Гааза-ван-Альфена.

Полупроводники. Электронная структура типичных полупроводников. Германий. Узкозонные полупроводники. Примесные уровни. Доноры и акцепторы. Температурная зависимость проводимости. p-n переходы. Фотопроводимость. Рекомбинация и релаксация неравновесных носителей. Горячие носители.

1. **Колебания решетки**

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

1. **Тепловые свойства твердых тел**

Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана - Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

9. **Электронные свойства твердых тел**

Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

10. **Магнитные свойства твердых тел**

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри - Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

Спиновые волны, магноны. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

11. **Механические, оптические и магнитооптические свойства твердых тел**

Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига.

Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

Тензор упругих постоянных и упругая деформация. Пластичность кристаллов. Предел текучести. Упрочнение. Внутреннее трение.

Механизм поглощения фотонов. Поглощение свободными носителями. Решеточное поглощение. Многофотонные процессы. Комбинационное рассеяние света в кристаллах. Поглощение связанными носителями. Правила отбора. Междузонные прямые и непрямые переходы. Экситоны. Времена жизни возбуждений, флюоресценция. Безызлучательные переходы. Квантовый выход люминесценции.

Диамагнетизм свободного электронного газа. Спиновый парамагнетизм. Закон Кюри. Ферромагнетизм. Молекулярное поле Вейса. Обменное взаимодействие. Ферромагнитные домены. Энергия анизотропии. Доменная стенка. Антиферромагнетики. Ферриты.

12. **Сверхпроводимость**

Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

Эффект Джозефсона. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

# **Диэлектрики**

Эффективное поле. Электронная, ионная и дипольная поляризация. Электрострикция и пьезоэлектричество. Сегнетоэлектрики. Электрический гистерезис. Молекулярные кристаллы.

# **Термодинамика и фазовые переходы**

Равновесие фаз. Фазовые переходы I и II рода. Теория фазовых переходов Ландау. Флуктуации, твердые растворы и промежуточные фазы. Равновесие в многокомпонентных системах и правило фаз. Диаграммы равновесия. Кинетика фазовых превращений. Диффузионные и бездиффузионные превращения.

# **Сверхпроводимость**

Основные свойства сверхпроводников. Эффект Мейснера. Сверхпроводники I и II рода. Вихри и вихревые структуры. Основы микроскопической теории. Куперовские пары. Энергетическая щель и квазичастицы в сверхпроводниках. Туннельный эффект. Эффекты Джозефсона.

# **Экспериментальные методы физики твердого тела**

Рентгенография: методы исследования идеальной и реальной структуры. Электронография и электронная микроскопия. Нейтронография: упругое и неупругое когерентное рассеяние, исследование магнитных структур и фононных спектров. Эффект Мессбауэра. ЭПР. ЯМР. Спектроскопия твердых тел (Раман, ИК, Бриллюэновское рассеяние и др.) Электрические и гальваномагнитные измерения как методы изучения электронной структуры кристаллов и состава примесей в полупроводниках.

# **Физика наноструктур**

Определение наноструктур, особенности их физических характеристик. Размерное квантование, электронные и колебательные спектры наноструктур. Металлические кластеры. Фуллерены и нанотрубки. Графен. Полупроводниковые низкоразмерные структуры. Гетеропереходы и квантовые ямы.

# **Физика жидкостей и стекол**

Структура жидкостей и стекол. Жидкие кристаллы. Статический и динамический структурный фактор. Вязкость жидкостей. Стеклование. Электронные и решеточные возбуждения в неупорядоченных средах. Локализация.

Основная литература

1. Ашкрофт Н. Мермин Н. Физика твердого тела, т. 1,2 // М., Наука, 1979. 458 и 486 с.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела // М., Наука, 1978, 792 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1 // М., Наука, 1995, 583 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости // М., Наука, 1987, 246 с.
5. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел // М., Наука, 1967, 492 с.
6. Суровцев Н.В. Спектроскопия конденсированных сред, Учебное пособие // Новосибирск, 2010, 237 с
7. Займан Дж. Принципы теории твердого тела // М., Мир, 1974, 472 с.
8. Займан Дж. Модели беспорядка // М., Мир, 1982, 591 с.
9. Anderson D.L. New theory of the Earth // Cambridge University Press, 2007, 400 p.
10. Tinkham M. Introduction to superconductivity (2nd Edition) // McGraw Hill, 1996, 472 р.

# Дополнительная литература

1. Абрикосов А.А. Основы теории металлов // М., Наука, 1987.
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников // М., Наука, 1987.
3. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах // М., ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. Мануэль Кардона Ю.П. Основы физики полупроводников // М. ФИЗМАТЛИТ, 2002.
5. Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах // М., Наука, 1968.
6. Твердые тела под высоким давлением, под ред. В. Пола и Д. Варшауэра // М., Мир, 1966.
7. Задачи по физике твердого тела, под ред. Г.Дж. Голдсмида // М., Наука, 1982.
8. Stanley H.E. Introduction to phase transitions and critical phenomena // Clarendon Press, Oxford, 1971.
9. Chaikin P.M., Lubensky T.C. Principles of condensed matter physics // Cambridge Univ. Press, 1995.
10. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика, т.1 // М., Мир, 1978.
11. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов // М. Наука, 1982.
12. Любарский Г.Я. Теория групп и ее применение в физике // М., ГИФМЛ, 1958.
13. Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях // М., Химия, 1976.
14. Eremets M.I. High Pressure experimental methods // Oxford University Press, 1996.
15. Свенсон К. Физика высоких давлений // М., ИЛЛ, 1963.
16. Мендельсон К. На пути к абсолютному нулю // М., Атомиздат, 1971.
17. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента // М., Мир, 1966.
18. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К // М., Мир, 1977.
19. Буккель В. Сверхпроводимость // М., Мир, 1975.
20. Тябликов С.В. Методы квантовой теории магнетизма // М., Наука, 1975.
21. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика // М., Наука, 1971.
22. Нокс Р., Голд А. Симметрия в твердом теле // М., Наука, 1980.
23. Вонсовский С.В., Кацнельсон М.И. Квантовая физика твердого тела // М., Наука, ФМЛ, 1983.
24. Маделунг О. Физика твердого тела // М., Наука, ФМЛ, 1985.
25. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику // М., ООО "Наука и Образование". 2013.
26. Dupas C., Houdy P., Lahmani M. (Eds.) Nanoscience: Nanotechnologies and Nanophysics

// Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.