

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: **Дефекты кристаллического строения и  
диффузионные явления в металлах**

Екатеринбург  
2025

## 1 Дефекты кристаллической решётки

1. Точечные дефекты. Виды точечных дефектов. Термодинамика точечных дефектов. Миграция точечных дефектов. Взаимодействие дефектов. Способы образования дефектов. Источники и стоки точечных дефектов. Комплексы точечных дефектов. Методы определения концентрации вакансий, энергии их образования и миграции.

2. Дислокации. Основные типы дислокаций. Скольжение и переползание дислокаций. Вектор Бюргерса. Энергия дислокаций. Силы, действующие на дислокацию. Взаимодействие параллельных дислокаций. Полные и частичные дислокации. Дефекты упаковки. Дислокации в ГЦК, ОЦК и ГПУ кристаллических решётках. Дислокации в упорядоченных сплавах. Пересечение дислокаций. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Образование дислокаций.

3. Границы зёрен и субзёрен. Малоугловые границы. Высокоугловые границы. Модели высокоугловых границ зёрен. Специальные и произвольные границы. Зернограничные дислокации. Структура границ зёрен. Геометрическая теория структуры границ зёрен и вспомогательные решётки. Нуль решётка. Решётка вспомогательных узлов. Полная решётка наложений. Модели структурных элементов границ зёрен. Энергия границ. Зернограничная сегрегация примесей. Термодинамика границ зёрен. Статистическая теория адсорбции на границах зёрен. Фазовые переходы на границах зёрен. Миграция границ зёрен. Рост зёрен в поликристаллах.

### Литература

1. Термодинамика и кинетика границ зёрен в металлах / Бокштейн Б. С., Копецкий Ч. В., Швиндлерман Л.С. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Большеугловые границы зёрен / Глейтер Г., Чалмерс Б., пер. с англ. С. Н. Горина и В. М. Половова; вступ. статья Ч. В. Копецкого и Л. С. Швиндлермана. – М.: Мир, 1975. – 375с.

4. Границы зёрен и свойства металлов / Кайбышев О. А., Валиев Р. З. – М.: Металлургия, 1987. – 213 с.:
5. Кристаллография и дефекты в кристаллах/ Келли А., Гровс Г.; пер. с англ. С. Н. Горина, О. М. Кугаенко, В. С. Савченко; Под ред. М. П. Шаскольской. – М.: Мир, 1974. – 496 с.
6. Кристаллография и дефекты кристаллической решётки: учеб. для вузов / Новиков И. И., Розин К. М. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
7. Границы зёрен в металлах / Орлов А. Н., Перевезенцев В. Н., Рыбин В. В.; под общ. ред. М. Л. Бернштейна и И. И. Новикова – М.: Металлургия, 1980. – 154 с.
8. Фазовые переходы на границах зёрен / Страумал Б. Б. – М.: Наука, 2003. – 326 с.
9. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах / Б. С. Бокштейн, Ч. В. Копецкий, Л. С. Швиндлерман и др.; отв. ред. Б. С. Бокштейн. – М.: Наука, 1988. – 272 с.
10. Дефекты кристаллического строения металлов и методы их анализа: учебник / Портной В. К., Новиков А. М., Головин И. С. – М.: Дом МИСиС, 2015. – 508 с.
11. Теория дислокаций / Хирт Дж. П., Лоте И.; пер. с англ.; под ред. Э. М. Нагорного и Ю. А. Осипьяна. – М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.

## **2 Объёмная диффузия в твёрдых телах**

1. Общие законы диффузии. Диффузионный поток. Первый закон Фика. Различные типы диффузионных коэффициентов. Второй закон Фика. Решения второго уравнения диффузии. Диффузия и случайные блуждания. Зависимость коэффициента диффузии от температуры. Механизмы диффузии в металлах. Связь между коэффициентом самодиффузии и характеристиками вакансий.

2. Феноменологическая теория диффузии. Движущая сила диффузионного массопереноса. Описание диффузии по Онзагеру. Теория взаимной диффузии Даркена и эффект Киркендалла. Уточнение теории Даркена по Маннингу. Взаимная диффузия в многокомпонентных системах. Взаимная диффузия при наличии градиента температуры и внешнего силового

поля.

## Литература

1. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах: Учеб. пособие для вузов по спец. "Физ.-хим. исслед. металлург. процессов", "Физика металлов", "Металловедение, оборуд. и технологии терм. обраб. металлов". – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
2. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах / Бокштейн Б. С., Бокштейн С. З., Жуховицкий А. А.. – М.: Металлургия, 1974. – 280 с.
3. Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах – М.: МИСИС, 2005 (ППП Тип. Наука). м 362 с. (Металлургия и материаловедение XXI века).
4. Ворошнин Л.Г., Хусид Б.М. Диффузионный массоперенос в многокомпонентных системах/ Под ред. Б.М.Смольского. – Минск: Наука и техника, 1979. – 256 с.
5. Гуров К. П., Карташкин Б. А., Угасте Ю. Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах/ Под ред. К. П. Гурова. – М.: Наука, 1981. – 350 с.
6. Маннинг Дж. Кинетика диффузии атомов в кристаллах / Пер. с англ. Д. Е. Темкина; под ред. Б. Я. Любова. – М.: Мир, 1971. – 277 с.
7. Процессы взаимной диффузии в сплавах / Боровский И. Б., Гуров К. П., Марчукова И. Д., Угасте Ю. Э.; под ред. Гурова К. П. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 360 с.

### **3 Диффузия по дислокациям, границам зёрен и фаз**

1. Модель изолированной границы Фишера. Решение Фишера для постоянного источника. Точное решение Уиппла для постоянного источника. Точное решение Судзуоки для мгновенного источника.
2. Диффузия в поликристаллах. Классификация диффузионных кинетических режимов по Харрисону. Кинетические режимы типа А, В и С. Определение диффузионной ширины границы зерна и коэффициентов сегрегации на основании результатов диффузионных экспериментов для

режимов В и С. Модель кубических зерен. Модель параллельных границ. Модель сферических зерен. Модель Левина-МакКаллума.

3. Диффузия по дислокациям и малоугловым границам зёрен. Модель дислокационной трубки. Уравнение диффузии вдоль дислокационной трубки. Решения Ле Клера-Рабиновича: изолированная дислокационная трубка. Решение Ле Клера Рабиновича: дислокационная стенка.

4. Зернограничная диффузия в тонких плёнках.

5. Диффузия по мигрирующим границам зерен. Прерывистое выделение. Прерывистое огрубление. Прерывистое растворение. Миграция границ зерен, вызванная диффузией.

6. Механизмы зернограничной диффузии. Влияние структуры границ на диффузию. Влияние кристаллической структуры на зернограничную диффузию. Сегрегационные эффекты зернограничной диффузии.

## Литература

1. Термодинамика и кинетика границ зёрен в металлах / Бокштейн Б. С., Копецкий Ч. В., Швиндлерман Л. С.. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

2. Диффузия атомов и ионов в твёрдых телах / Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б. – М.: МИСИС, 2005 (ППП Тип. Наука). – 362 с.

3. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Ю. Р. Колобов, Р. З. Валиев, Г. П. Грабовецкая и др. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.

4. Диффузия по границам зерен и фаз/ Каур И., Густ В., пер. с англ. Б. Б. Страумала; под ред. Л. С. Швиндлермана. – М.: Машиностроение, 1991. – 446 с.

5. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах / Бокштейн Б. С., Копецкий Ч. В., Швиндлерман Л. С. и др.; отв. ред. Бокштейн Б. С. – М.: Наука, 1988. – 272 с.

## 4 Наноструктуры

1. Классификация и методы получения нанокластеров и наноструктур. Газовая конденсация порошков и их консолидация. Шаровой размол порошков и их компактирование. Интенсивная пластическая деформация. Углеродные кластеры. Фуллерены. Углеродные нанотрубки. Тонкие наноструктурированные пленки. Методы получения тонких пленок.

2. Особенности структуры наноматериалов. Структурные модели наноматериалов. Модели неравновесных границ зерен в наноматериалах. Особенности зернограничной диффузии в нанокристаллических и наноструктурных материалах.

3. Магнитные свойства наноструктур. Суперпарамагнетизм. Намагниченность и квантовое магнитное туннелирование. Электросопротивление металлических сверхрешеток, обладающих магнитным порядком. Эффект гигантского магнитосопротивления, его физическая природа. Эффект однонаправленной обменной анизотропии. Спиновый клапан. Магниторезистивные сенсоры. Магнитные фазовые переходы в наносистемах.

### Литература

1. Объёмные наноструктурные материалы / Валиев Р. З., Александров И. В. – М.: ИТЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Колобов Ю. Р., Валиев Р. З., Грабовецкая Г. П. и др. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.
3. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / Гусев А. И. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009 – 416 с.
4. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / Суздаев И.П., 2-е изд., испр. – М.: URSS: Либроком, 2009. – 589 с.
5. Нанокристаллы, закалённые из расплава / Глезер А. М. Пермякова И. Е. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.

6. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Козлов Э. В., Глезер А. М., Конева Н. А., Попова Н. А., Курзина И. А. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 304 с.

## **5 Методы исследования структуры, дефектов и диффузии в твёрдых телах**

1. Просвечивающая электронная микроскопия. Конструкция микроскопа и принцип его работы. Методы электронно-микроскопического исследования металлов и сплавов. Микродифракция. Информация, получаемая при исследовании металлов и сплавов методом тонких фольг. Электронная микроскопия прямого разрешения.

2. Микрорентгеноспектральный анализ и растровая электронная микроскопия. Взаимодействие электронного пучка с веществом. Принцип работы растрового электронного микроскопа и рентгеновского микроанализатора. Конструкция растрового электронного микроскопа и рентгеновского микроанализатора. Количественный микрорентгеноспектральный анализ. Поправки на поглощение, атомный номер, флуоресценцию. Принцип работы

3. Туннельная и атомно-силовая микроскопия.

4. Рентгеноструктурный анализ. Аппаратура. Анализ структурного состояния металлических материалов. Анализ напряжений. Анализ дефектов кристаллического строения.

5. Оже-электронная спектроскопия. Основные процессы. Энергетические уровни и форма пиков. Оже-спектроскопия как метод анализа поверхности.

6. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия. Природа эффекта. Абсорбционная и эмиссионная мессбауэровская спектроскопия. Параметры гамма-резонансных спектров. Вероятность эффекта Мессбауэра. Изомерный сдвиг. Квадрупольное взаимодействие. Магнитная сверхтонкая структура. Определение температуры Дебая. Применение ЯГР для исследования границ зёрен. Применение ЯГР для исследования диффузии и дефектов.

7. Авторадиография. Качественная авторадиография. Количественная авторадиография.

8. Послойный радиометрический анализ. Методы снятия слоев. Методы снятия ультратонких слоёв. Метод остаточной активности Грузина.

9. Метод ядерного магнитного резонанса.

## Литература

1. Электронная микроскопия тонких кристаллов / Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М.; пер. с англ. под ред Л. М. Утевского. – М.: Мир, 1968. – 574 с.

2. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении / Утевский А.М. – М.: Metallurgia, 1983. – 584 с.

3. Эффект Мессбауэра. Принципы и применения / Вертгейм Г.; пер. с англ. А. М. Афанасьева, под ред. В. В. Скляревского. – М.: Мир, 1966. – 172 с.

4. Современные методы исследования поверхности / Вудраф Д., Делчар Т. пер.с англ. Е.Ф.Шека, под ред. В. И. Раховского. – М.: Мир, 1989. – 568 с.

5. Диффузия по границам зёрен и фаз / Каур И., Густ В., пер. с англ. Б. Б. Страумала, под ред. Л. С. Швиндлермана. – М.: Машиностроение, 1991. – 446 с.

6. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник. - В 3-х т. / Б. С. Бокштейн, Ю. Г. Векслер, Б. А. Дроздовский и др., Под общ. ред. А. Г. Рахштадта и др. - Т.1: Методы испытаний и исследования. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 688 с.

7. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица, пер. с англ. под ред. В. И. Петрова – М.: Мир, 1978. – 656 с.

8. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тиксье; пер. с французского Г. Д. Стельмаковой, под ред. И. Б. Боровского. – М.: Metallurgia, 1985. – 392 с.

9. Электронно-зондовый микроанализ / Рид С. Дж. Б.; пер. с англ. А. И. Козленкова – М.: Мир, 1979. – 423 с.

10. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Уманский Я. С., Скаков Ю. А. и др. – М.: Metallurgia, 1982. – 631 с.

11. Физическое металловедение. В 3-х т. / Под ред. Кана Р. У., Хаазена П.; пер.с англ. под ред. Абрамова О. В., Серебрякова А. В.- Изд. 3-е, перераб. и

доп. - Т.1: Атомное строение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1987. – 640 с.

12. Химические применения мессбауэровской спектроскопии / Под ред. В. И. Гольданского и др.; пер. с англ. Б. И. Рогозева и др. – М.: Мир, 1970. – 502 с.

13. Мессбауэровская спектроскопия в металловедении / Литвинов В. С., Литвинов А. В. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 130 с.

14. Электронная и ионная спектроскопия твёрдых тел / Маан Дж., Спайсер В., Либш А. и др.; под ред. Л. Фирмэнса и др; пер. с англ. под ред. В. И. Раховского. – М.: Мир, 1981. – 467 с.

15. Основы теории магнитного резонанса / Сликтер Ч. – М: Мир, 1981. – 448 с.

16. Квантовая радиофизика. Магнитный резонанс и его приложения / Бородин П. М, Вечерухин Н. М, Касперович В. С, Комолкин А. В, Мельников А. В, Москалев В. В, Фролов В. В, Чернышев Ю. С, Чижик В. И, Шеляпина М. Г. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2009. – 700 с.