

## **Оглавление**

Предисловие английского издания

Историческое введение и основная библиография по проблемам диффузии

### **Часть 1. Основы диффузии**

#### **Глава 2.**

##### **Континуальная теория диффузии**

2.1 Законы Фика в изотропных средах

2.1.1 Первый закон Фика

2.1.2 Уравнение непрерывности

2.1.3 Второй закон Фика – диффузионное уравнение

2.2 Диффузионное уравнение в разных системах координат

2.3 Законы Фика в анизотропных средах

Литература

#### **Глава 3.**

##### **Решения диффузионного уравнения**

3.1 Стационарная диффузия

3.2 Одномерная релаксационная диффузия

3.2.1 Решение для тонких пленок

3.2.2 Протяженное пространственное распределение и постоянная концентрация на поверхности

3.2.3 Метод преобразования Лапласа

3.2.4 Диффузия в плоском слое – разделение переменных

3.2.5 Радиальная диффузия в цилиндре

3.2.6 Радиальная диффузия в сфере

Литература

#### **Глава 4.**

##### **Теория случайных блужданий и процессы атомных скачков**

4.1 Случайные блуждания и диффузия

4.1.1 Упрощенная модель

4.1.2 Соотношением Эйнштейна-Смолуховского

4.1.3 Случайные блуждания по решетке

4.1.4 Коэффициент корреляции

4.2 Процесс атомных скачков

Литература

#### **Глава 5.**

##### **Точечные дефекты в кристаллах**

5.1 Чистые металлы

5.1.1 Вакансии

5.1.2 Дивакансии

5.1.3 Определение свойств вакансий

5.1.4 Собственные междоузлия

5.2 Бинарные сплавы замещения

5.2.1 Вакансии в разбавленных сплавах

5.2.2 Вакансии в концентрированных сплавах

5.3 Ионные соединения

5.3.1 Дефекты по Френкелю

5.3.2 Дефекты по Шоттки

5.4 Интерметаллиды

## 5.5. Полупроводники

Литература

## Глава 6.

### Механизмы диффузии

6.1 Межузельный механизм

6.2 Коллективные механизмы

6.3 Вакансионный механизм

6.4 Дивакансионный механизм

6.5 Непрямой межузельный механизм

6.6 Межузельно-узельные обменные механизмы

Литература

## Глава 7

### Корреляции в твердотельной диффузии

7.1 Межузельный механизм

7.2 Непрямой межузельный механизм

7.3 Вакансионный механизм самодиффузии

7.3.1 Приблизительная оценка

7.3.2 Столкновения вакансии с меченым атомом

7.3.3 Пространственные и временные корреляции

7.3.4 Вычисление корреляционных коэффициентов

7.4 Корреляционные коэффициенты для самодиффузии

7.5 Стимулированная вакансиями диффузия примесей

7.5.1 Кубические гранецентрированные растворители

7.5.2 Кубические объемноцентрированные растворители

7.5.3 Растворители с алмазной решеткой

7.6 Заключительные замечания

Литература

## Глава 8.

### Зависимость диффузии от температуры и давления

8.1 Температурная зависимость

8.1.1 Формула Аррениуса

8.1.2 Активационные параметры - примеры

8.2 Зависимость от давления

8.2.1 Активационные объемы для самодиффузии

8.2.2 Активационные объемы для диффузии растворенных атомов

8.2.3 Активационные объемы в ионных кристаллах

8.3 Корреляции между диффузией и объемными свойствами

8.3.1 Параметры плавления и диффузия

8.3.2 Активационные параметры и постоянные упругости

8.3.3 Использование корреляций

Литература

## Глава 9.

### Влияние изотопного состава на диффузию

9.1 Механизмы с одиночным скачком

9.2 Коллективные механизмы

9.3 Экспериментальные исследования влияния изотопного состава

Литература

## Глава 10.

### Взаимная диффузия и эффект Киркендала

- 10.1 Взаимная диффузия
    - 10.1.1 Преобразование Больцмана
    - 10.1.2 Метод Больцмана-Матано
    - 10.1.3 Метод Зауэра-Фрейзе
  - 10.2 Собственная диффузия и эффект Киркендаля
  - 10.3 Уравнения Даркена
  - 10.4 Уравнения Даркена-Маннинга
  - 10.5 Микроструктурная стабильность плоскости Киркендаля
- Литература

## **Глава 11.**

### **Диффузия и внешние движущие силы**

- 11.1 Краткий обзор
  - 11.2 Уравнения Фика с дрейфом
  - 11.3 Соотношение Нернста-Энштейна
  - 11.4 Соотношение Нернста-Энштейна для ионных проводников и отношение Хавена
  - 11.5 Уравнение Нернста-Планка – взаимная диффузия в ионных кристаллах
  - 11.6 Сравнение уравнения Нернста-Планка с уравнением Даркена
- Литература

## **Глава 12.**

### **Термодинамика необратимых процессов и диффузия**

- 12.1 Общие замечания
  - 12.2 Феноменологические уравнения изотермической диффузии
    - 12.2.1 Самодиффузия меченых атомов в элементарных кристаллах
    - 12.2.2 Диффузия в бинарных сплавах
  - 12.3 Феноменологические коэффициенты
    - 12.3.1 Феноменологические коэффициенты, коэффициенты диффузии меченых атомов и модели перескоков
    - 12.3.2 Правила сложения – соотношения между феноменологическими коэффициентами
- Литература

## **Часть 2.**

### **Экспериментальные методы**

## **Глава 13.**

### **Прямые методы изучения диффузии**

- 13.1 Сравнение прямых и косвенных методов
  - 13.2 Различные коэффициенты диффузии
    - 13.2.1 Коэффициенты диффузии меченых атомов
    - 13.2.2 Взаимная диффузия и собственные коэффициенты диффузии
  - 13.3 Эксперименты по диффузии меченых атомов
    - 13.3.1 Анализ профиля путем последовательного секционирования
    - 13.3.2 Метод остаточной активности
  - 13.4 Гетероструктуры с контролем изотопного состава
  - 13.5 Вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС)
  - 13.6 Рентгено-спектральный микроанализ (РСМА)
  - 13.7 Оже-электронная спектроскопия (ОЭС)
  - 13.8 Ионно-лучевые методы анализа: ОРР и МЯР
- Литература

## **Глава 14.**

### **Механическая спектроскопия**

- 14.1 Общие замечания
  - 14.2 Неупругость и внутреннее трение
  - 14.3 Методы механической спектроскопии
  - 14.4 Примеры неупругих явлений, связанных с диффузией
    - 14.4.1 Эффект Снука (релаксация Снука)
    - 14.4.2 Эффект Зенера (релаксация Зенера)
    - 14.4.3 эффект Горского (релаксация Горского)
    - 14.4.4 Механические потери в ионно-проводящих стеклах
  - 14.5 Магнитная релаксация
- Литература

## **Глава 15.**

### **Ядерные методы**

- 15.1 Общие замечания
  - 15.2 Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)
    - 15.2.1 Основы ЯМР
    - 15.2.2 Прямые измерения диффузии методом ЯМР с градиентным полем
    - 15.2.3 Релаксационные методы ЯМР
  - 15.3 Мессбауэровская спектроскопия (МС)
  - 15.4 Квазиупругое нейтронное рассеяние (КУНР)
    - 15.4.1 Примеры исследований методом КУНР
    - 15.4.2 Достоинства и ограничения методов МС и КУНР
- Литература

## **Глава 16.**

### **Электрические методы**

- 16.1 Импедансная спектроскопия
  - 16.2 Профилирование методом измерения сопротивления растекания
- Литература

## **Часть 3.**

### **Диффузия в металлических материалах**

## **Глава 17.**

### **Самодиффузия в металлах**

- 17.1 Общие замечания
  - 17.2 Кубические кристаллы
    - 17.2.1 ГЦК металлы –эмпирические данные
    - 17.2.2 ОЦК металлы –эмпирические данные
    - 17.2.3 Интерпретация с учетом моновакансий
    - 17.2.4 Интерпретация с учетом моно- и дивакансий
  - 17.3 Плотнупакованные гексагональные и тетрагональные металлы
  - 17.4 Металлы с фазовыми переходами
- Литература

## **Глава 18.**

### **Диффузия междоузельных примесей в металлах**

- 18.1 «Тяжелые» междоузельные примеси С, N и O
  - 18.1.1 Общие замечания
  - 18.1.2 Экспериментальные методы
  - 18.1.3 Междоузельная диффузия в разбавленных междоузельных сплавах

- 18.2 Диффузия водорода в металлах
- 18.2.1 Общие замечания
- 18.2.2 Экспериментальные методы
- 18.2.3 Примеры диффузии водорода
- 18.2.4 Неклассические изотопные эффекты
- Литература

## **Глава 19.**

### **Диффузия в разбавленных сплавах замещения**

- 19.1 Диффузия примесей
- 19.1.1 «Нормальная» диффузия примесей
- 19.1.2 Диффузия примесей в Al
- 19.2 Диффузия примесей в «открытых» металлах
- 19.2.1 Диссоциативный механизм диффузии
- 19.3 Диффузия растворенных атомов и атомов растворителя в сплавах
- Литература

## **Глава 20.**

### **Диффузия в бинарных интерметаллидах**

- 20.1 Общие замечания
- 20.2 Влияние переходов порядок-беспорядок
- 20.3 B2 интерметаллиды
- 20.3.1 Диффузионные механизмы в фазе B2
- 20.3.2 Пример B2 NiAl
- 20.3.3 Пример B2 Fe-Al
- 20.4 L1<sub>2</sub> интерметаллиды
- 20.5 D0<sub>3</sub> интерметаллиды
- 20.6 Одноосные интерметаллиды
- 20.6.1 L1<sub>0</sub> интерметаллиды
- 20.6.2 Дисилирид молибдена ( структура C11<sub>b</sub>)
- 20.7 Фазы Лавеса
- 20.8 Правило Cu<sub>3</sub>Au
- Литература

## **Глава 21.**

### **Диффузия в квазикристаллических сплавах**

- 21.1 Краткое введение в квазикристаллы
- 21.2 Особенности диффузии в квазикристаллах
- 21.2.1 Икосаэдрические квазикристаллы
- 21.2.2 Десятиугольные квазикристаллы
- Литература

## **Часть 4.**

### **Диффузия в полупроводниках**

## **Глава 22.**

### **Общие введение в полупроводники**

- 22.1 «Полупроводниковый век» и диффузия
- 22.2 Специфические черты диффузии в полупроводниках
- Литература

## **Глава 23**

### **Самодиффузия в элементарных полупроводниках**

- 23.1 Собственные точечные дефекты и диффузия
- 23.2 Германий
- 23.3 Кремний
- Литература

#### **Глава 24.**

##### **Диффузия примесных атомов в кремнии и германии**

- 24.1 Растворимость и заполнение позиций в решетке
- 24.2 Коэффициенты диффузии и режимы диффузии
  - 24.2.1 Межузельная диффузия
  - 24.2.2 Диффузия легирующих примесей
  - 24.2.3 Комбинированная диффузия примесей
- 24.3 Самодиффузия и диффузия примесных атомов - резюме
- Литература

#### **Глава 25.**

##### **Межузельно-узельная диффузия**

- 25.1 Комбинированные механизмы диссоциативной диффузии и диффузии с вытеснением
  - 25.1.1 Диффузия, ограниченная потоком собственных точечных дефектов
  - 25.1.2 Диффузия, ограниченная потоком межузельных атомов примеси
  - 25.1.3 Численный анализ промежуточного случая
- 25.2 Механизм диффузии с вытеснением
  - 25.2.1 Основные уравнения и два решения
  - 25.2.2 Примеры диффузии с вытеснением
- 25.3 Диссоциативный механизм диффузии
  - 25.2.2 Основные уравнения
  - 25.2.2 Примеры диссоциативной диффузии
- Литература

### **Часть 5.**

#### **Диффузия и проводимость в ионных кристаллах**

#### **Глава 26.**

##### **Ионные кристаллы**

- 26.1 Общие замечания
- 26.2 Точечные дефекты в ионных кристаллах
  - 26.2.1 Собственные точечные дефекты
  - 26.2.1 Несобственные точечные дефекты
- 26.3 Методы исследования точечных дефектов и транспортных свойств (явлений переноса?)
- 26.4 Галогениды щелочных металлов
  - 26.4.1 Движение дефектов, самодиффузия меченных атомов и ионная проводимость
  - 26.4.2 Пример NaCl
  - 26.4.3 Общие свойства галогенидов щелочных металлов
- 26.5 Галогениды серебра AgCl и AgBr
  - 26.5.1 Самодиффузия и ионная проводимость
  - 26.5.2 Влияние легирования
- Литература

#### **Глава 27.**

##### **Суперионные проводники**

- 27.1 Проводники с высокой проводимостью по ионам серебра
    - 27.1.1 AgI и родственные простые анионные структуры
    - 27.1.2 RbAg<sub>4</sub>I<sub>5</sub> и родственные соединения
  - 27.2 PbF<sub>2</sub> и другие галогенидные ионные проводники
  - 27.3 Стабилизированная двуокись циркония и родственные оксидные ионные проводники
  - 27.4 Перовскитные оксидные ионные проводники
  - 27.5 Натриевый β-глинозем и родственные материалы
  - 27.6 Литиевые ионные проводники
  - 27.7 Полимерные электролиты
- Литература

## **Часть 6.** **Диффузия в стеклах**

### **Глава 28.** **Стеклообразное состояние**

- 28.1 Что такое стекло?
  - 28.2 Диаграмма объем-температура
  - 28.3 Диаграмма превращение-время-температура
  - 28.4 Семейства стекол
- Литература

### **Глава 29.** **Диффузия в металлических стеклах**

- 29.1 Общие замечания
  - 29.2 Релаксация структуры и диффузия
  - 29.3 Диффузионные свойства металлических стекол
  - 29.4 Диффузия и вязкость в сплавах, образующих стекла
- Литература

### **Глава 30.** **Диффузия и ионная проводимость в оксидных стеклах**

- 30.1 Общие замечания
  - 30.2 Экспериментальные методы
  - 30.3 Проникновение газов
  - 30.4 Примеры диффузии и ионной проводимости
- Литература

## **Часть 7.** **Диффузия вдоль каналов ускоренной диффузии и в наноматериалах**

### **Глава 31.** **Каналы ускоренной диффузии в металлах**

- 31.1 Общие замечания
  - 31.2 Диффузионный спектр
  - 31.3 Эмпирические правила зернограницной диффузии
  - 31.4 Диффузия по решетке и микроструктурные дефекты
- Литература

### **Глава 32.** **Диффузия вдоль границ зерен**

- 32.1 Общие замечания
- 32.2 Границы зерен

- 32.1 Мало- и большеугловые границы
  - 32.2 Специальные большеугловые границы
  - 32.3 Диффузии вдоль изолированной границы (модель Фишера)
  - 32.4 Кинетика диффузии в поликристаллах
    - 32.4.1 Кинетический режим типа А
    - 32.4.2 Кинетический режим типа В
    - 32.4.3 Кинетический режим типа С
  - 32.5 Зернограничная диффузия и сегрегация
  - 32.6 Атомарные механизмы зернограничной диффузии
- Литература

### **Глава 33.**

#### **Трубочная диффузия по дислокациям**

- 33.1 Модель дислокационной трубки
  - 33.2 Решения для средней концентрации в тонком слое
- Литература

### **Глава 34.**

#### **Диффузия в нанокристаллических материалах**

- 34.1 Общие замечания
  - 34.2 Синтез нанокристаллических материалов
    - 34.2.1 Приготовление порошков
    - 34.2.2 Сильная пластическая деформация
    - 34.2.3 Химические методы синтеза и родственные методы
    - 34.2.4 Расстеклование аморфных прекурсоров
  - 34.3 Диффузия в поли- и нанокристаллах
    - 34.3.1 Размеры зерен и режимы диффузии
    - 34.3.2 Эффективные коэффициенты диффузии в поли- и наноматериалах
  - 34.4 Диффузия в нанокристаллических металлах
    - 34.4.1 Общие замечания
    - 34.4.2 Релаксация структуры и рост зерен
    - 34.4.3 Наноматериалы с бимодальной структурой зерен
    - 34.4.4 Границы зерен, образующие тройной стык
  - 34.5 Диффузия и ионная проводимость в нанокристаллических керамиках
- Литература
- Предметный указатель