МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

ЛЕКЦИЯ 04

# Микроскопические методы исследования

Оптическая микроскопия, SEM, EDS и TEM

Кратко: Микроскопия показывает форму, размеры и распределение нанообъектов.

# Цель лекции и ожидаемые результаты

**Понимать**

Объяснить: Задачи микроскопии. Микроскопия показывает форму, размеры и распределение нанообъектов.

**Сопоставлять**

Объяснить: Принцип просвечивающей ТЕМ. В ТЕМ ускоренные электроны проходят через достаточно тонкий образец.

**Применять**

Объяснить: Когда выбрать SEM или TEM. SEM удобен для изучения рельефа поверхности и крупных областей образца.

В этой лекции научные определения связываются с измеряемыми величинами, схемами и примерами обработки данных.

# Задачи микроскопии

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 01 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Микроскопия показывает форму, размеры и распределение нанообъектов.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Изображение зависит от принципа формирования контраста и подготовки образца.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Измерение · калибровка · вывод




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Оптическая микроскопия

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 02 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

В обычной оптической микроскопии разрешение ограничивается дифракцией света.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для оценки предельного расстояния используют критерий Рэлея и числовую апертуру.

**СООТНОШЕНИЕ**

$$d \approx 0{,}61\lambda/NA \quad \text{(критерий Рэлея)}$$




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Основные узлы SEM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 03 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

SEM формирует сфокусированный электронный зонд и сканирует им поверхность.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Детекторы регистрируют сигналы, возникающие при взаимодействии электронов с образцом.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Структура · состав · свойства




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Контраст SE и BSE

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 04 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Вторичные электроны преимущественно чувствительны к топографии поверхности.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Обратнорассеянные электроны часто создают контраст по среднему атомному номеру.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Измерение · калибровка · вывод




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Элементный анализ EDS

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 05 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

EDS регистрирует характеристическое рентгеновское излучение под действием электронного пучка.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Пространственное разрешение анализа ограничено объёмом взаимодействия и условиями измерения.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Условия опыта · повторяемость




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Принцип просвечивающей ТЕМ

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 06 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

В ТЕМ ускоренные электроны проходят через достаточно тонкий образец.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Контраст связан с рассеянием и изменением фазы электронной волны.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Структура · состав · свойства




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Структурный анализ в TEM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 07 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Электронная дифракция даёт информацию о кристаллической структуре и ориентации.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Высокоразрешающие изображения требуют учёта аберраций и толщины образца.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Измерение · калибровка · вывод




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Длина волны электрона

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 08 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

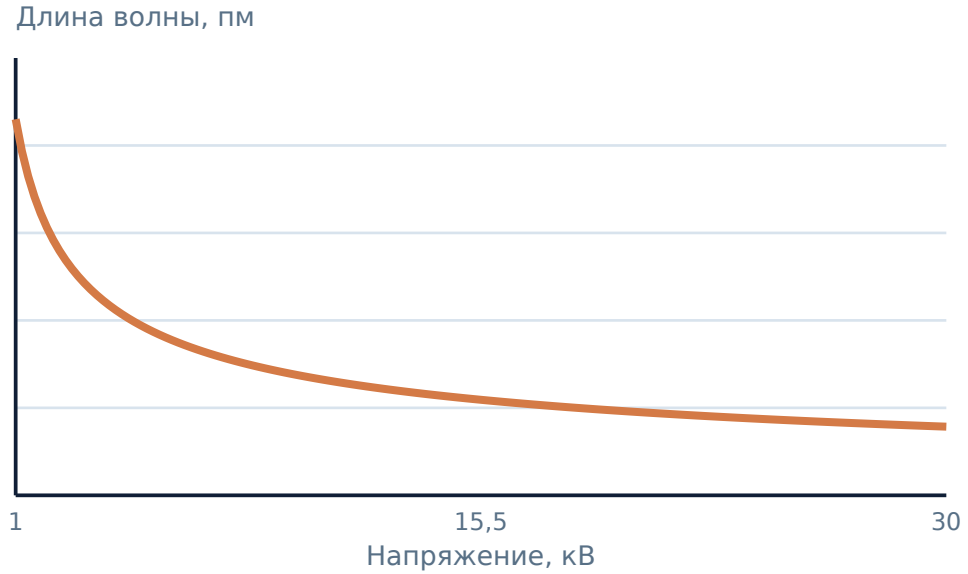
Для нерелятивистских энергий длина волны де Бройля обратно пропорциональна корню из напряжения.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

На больших ускоряющих напряжениях следует учитывать релятивистскую поправку.

**СООТНОШЕНИЕ**

$$\lambda = h/\sqrt{(2m_e eU)} \quad \text{(без поправки)}$$




**$\lambda \propto 1/\sqrt{U}$ (нерелятивистский случай)**

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Проверка масштаба изображения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 09 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Масштабная линейка должна соответствовать текущей калибровке увеличения.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Оценку размеров выполняют по исходным данным, а не по растянутому изображению.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Структура · состав · свойства




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Подготовка образцов

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 10 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Для SEM иногда требуется проводящий слой, а для TEM — электронно-прозрачный участок.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Подготовка может внести трещины, загрязнение и повреждения, похожие на реальные дефекты.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Измерение · калибровка · вывод




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Количественная морфометрия

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 11 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Размеры частиц измеряют по согласованному критерию и нескольким полям зрения.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Среднее значение дополняют распределением и количеством измеренных объектов.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Условия опыта · повторяемость




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Артефакты микроскопии

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 12 / 13

**ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ**

Зарядка, дрейф, загрязнение и повреждение пучком искажают изображения.

**ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ**

Изменение режима съёмки помогает отличить артефакт от свойства образца.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Структура · состав · свойства




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Когда выбрать SEM или TEM?

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 13 / 13

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

SEM удобен для изучения рельефа поверхности и крупных областей образца.

### ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

TEM применяют для внутренней наноструктуры, решётки и электронной дифракции.

**ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ**

Измерение · калибровка · вывод




ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

# Разбор расчётного примера: Масштаб изображения и разрешение

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Ширина поля SEM равна 5,0 мкм, ширина изображения — 1024 пикселя.

**РЕШЕНИЕ**

**5000 нм / 1024 ≈ 4,88 нм на пиксель.**

**КАК ПОНИМАТЬ РЕЗУЛЬТАТ**

Шаг пикселя не равен реальному пространственному разрешению микроскопа.

# Итоги лекции: главные выводы

**Принцип**

SEM формирует сфокусированный электронный зонд и сканирует им поверхность. Детекторы регистрируют...

**Применение**

Для нерелятивистских энергий длина волны де Бройля обратно пропорциональна корню из напряжения. На больших...

**Ограничения**

SEM удобен для изучения рельефа поверхности и крупных областей образца. TEM применяют для внутренней наноструктуры,...

Главный итог: обоснованный научный вывод требует корректной физической модели и проверки измерений.

# Контрольные вопросы и литература

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем различается контраст SE и BSE?
2. Как оценивают масштаб изображения?
3. В каких случаях нужен TEM вместо SEM?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas et al. Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization, 2017

2. MyScope: training resources for SEM/EDS

Материалы курса, 2026

Самостоятельное задание: назовите измеряемый параметр, предложите метод и укажите возможный источник ошибки.