МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

ЛЕКЦИЯ 02

Физико-химические свойства наноматериалов

Электронные, оптические, магнитные и механические эффекты

Кратко: При уменьшении размера возрастает вклад поверхности, интерфейсов и границ зёрен.

Цель лекции и ожидаемые результаты

Понимать

Объяснить: Почему изменяются свойства. При уменьшении размера возрастает вклад поверхности, интерфейсов и...

Сопоставлять

Объяснить: Электропроводность. Сопротивление зависит от размера, дефектов, температуры и качества...

Применять

Объяснить: Правильная интерпретация данных. Корреляция между размером и свойством сама по себе не доказывает...

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

Почему изменяются свойства?

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 01 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

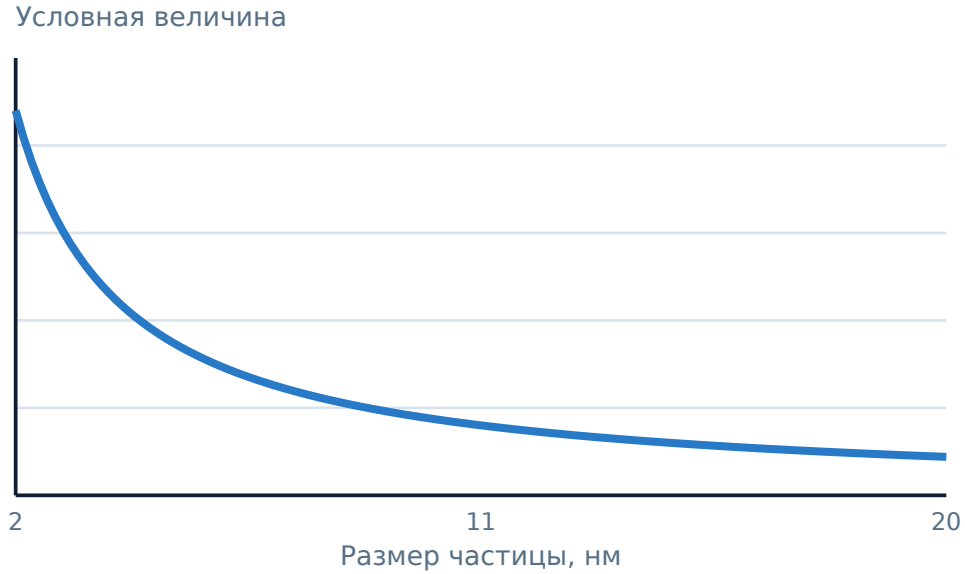
При уменьшении размера возрастает вклад поверхности, интерфейсов и границ зёрен.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Квантовые эффекты возникают не во всех материалах и зависят от характерных длин.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



S/V ∝ 1/d

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Размерное квантование электронных состояний

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 02 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

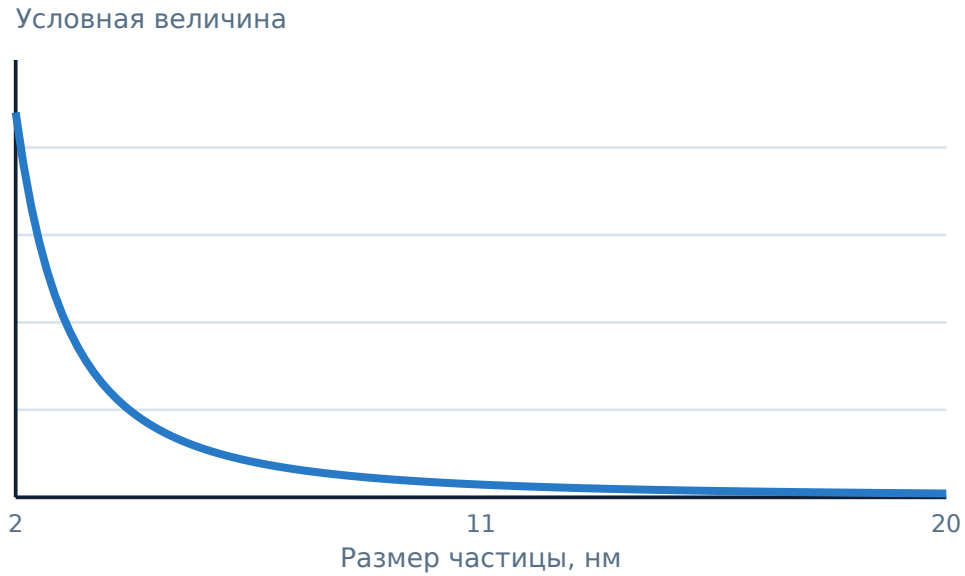
В ограниченном объёме допустимые электронные состояния могут становиться дискретными.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

В модели бесконечной квантовой ямы энергия масштабируется как обратный квадрат её ширины.

СООТНОШЕНИЕ

$$E_n = n^2h^2/(8m^*L^2)$$



$\Delta E \propto 1/L^2$

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Изменение ширины запрещённой зоны

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 03 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

В некоторых полупроводниковых нанокристаллах квантовое ограничение увеличивает энергию оптического перехода.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Реальная зависимость определяется эффективными массами, дефектами и состоянием поверхности.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства

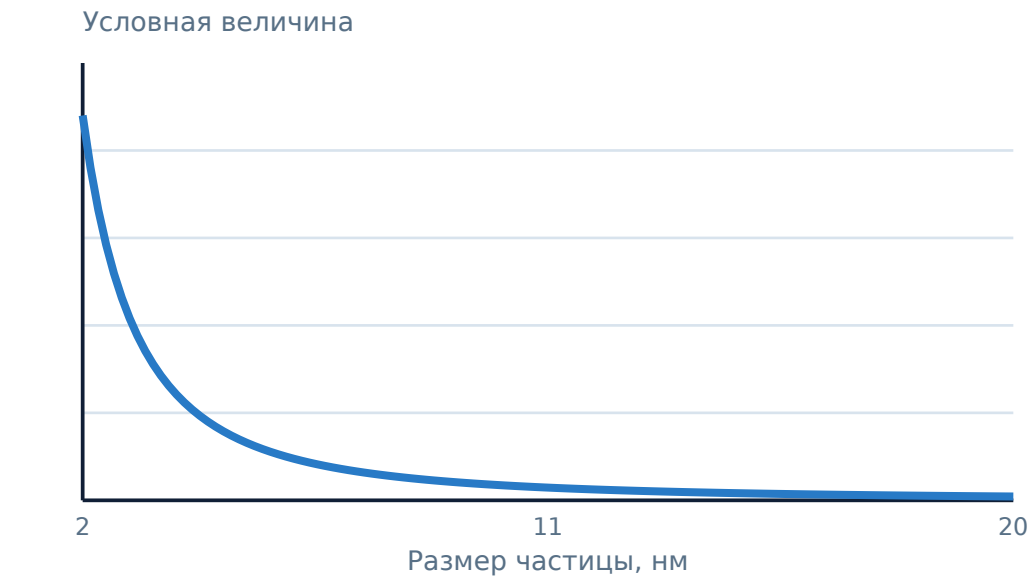


Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Поверхностная энергия и устойчивость

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 04 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

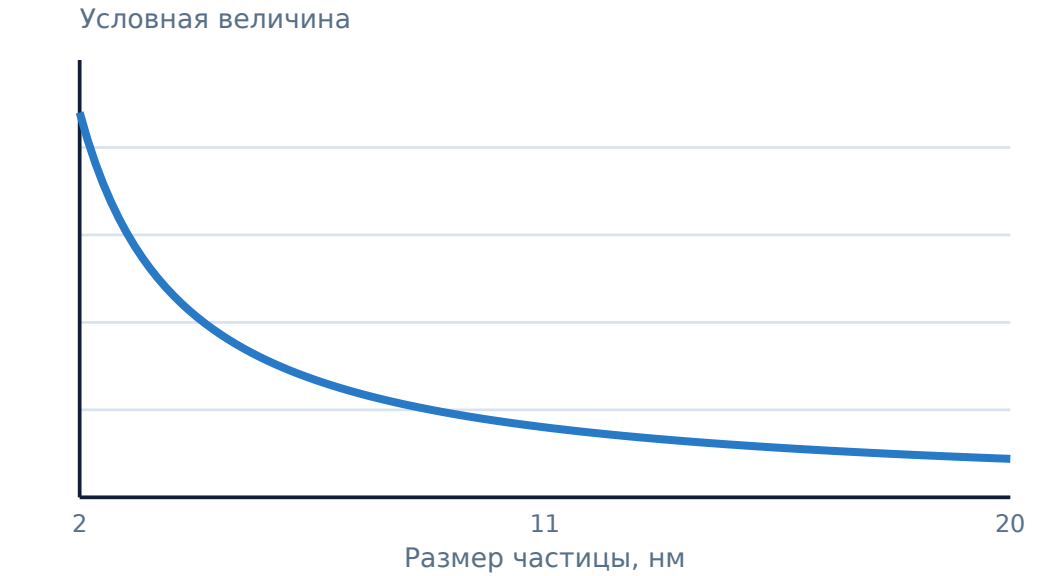
Наночастицы имеют большой вклад поверхностной свободной энергии.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Агломерация или изменение поверхности могут уменьшать общую энергию системы.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



S/V ∝ 1/d

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Оптические свойства

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 05 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

UV–Vis и фотолюминесценция позволяют исследовать оптические переходы и дефектные состояния.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Металлические наночастицы могут проявлять локализованный поверхностный плазмонный резонанс.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Электропроводность

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 06 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Сопротивление зависит от размера, дефектов, температуры и качества контактов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Четырёхзондовое измерение уменьшает влияние контактного сопротивления.

СООТНОШЕНИЕ

ρ = RA/L (однородный образец)



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Магнитные свойства

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 07 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Магнитное поведение наночастиц связано с доменной структурой и анизотропией.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для некоторых систем при малых размерах характерно суперпарамагнитное поведение.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Механические свойства

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 08 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

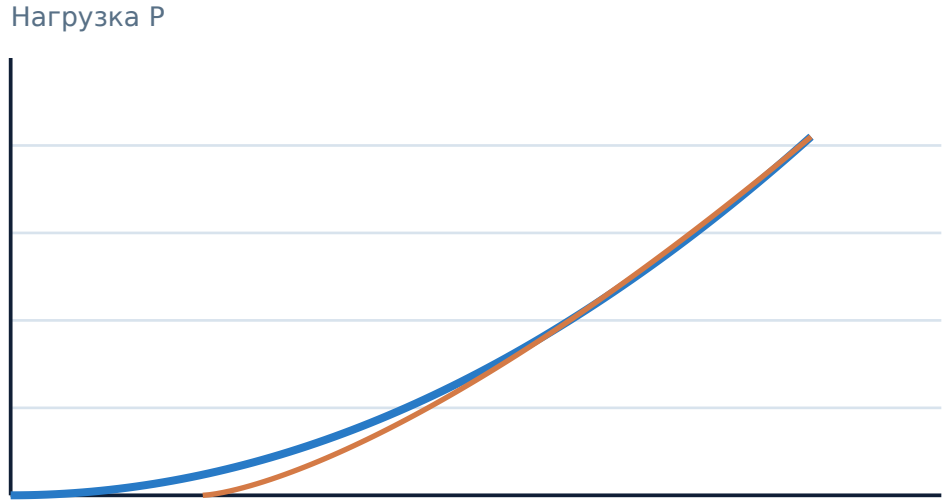
Границы зёрен и дефекты способны изменять твёрдость и пластичность материала.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Наноиндентация измеряет локальный отклик, который может зависеть от подложки.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



Нагружение / разгрузка МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Теплоперенос в наноструктурах

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 09 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Теплопроводность изменяется из-за рассеяния фононов и электронов на интерфейсах.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

При анализе тонких плёнок необходимо учитывать направление переноса тепла.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Химическая и каталитическая активность

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 10 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Активность зависит от природы доступных поверхностных центров, а не только от площади поверхности.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для корректного сравнения нужны одинаковые условия и способ нормировки скорости реакции.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Распределение частиц по размерам

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 11 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

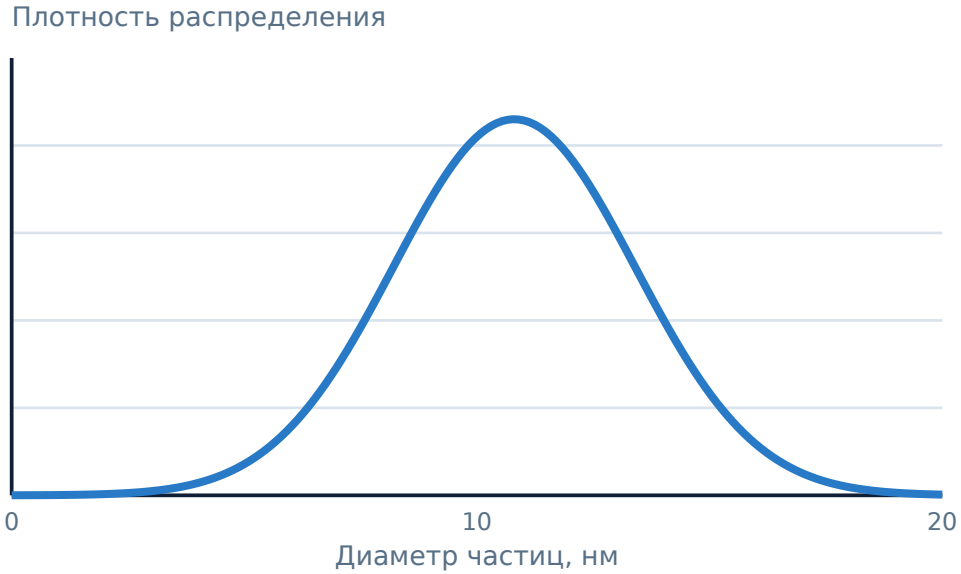
Одинаковый средний диаметр не означает одинаковое распределение размеров.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Гистограмма, медиана и интервал разброса дополняют среднее значение.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



Распределение размеров (модель) МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Комплексная характеристика материала

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 12 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

SEM, AFM и TEM уточняют геометрию, а XRD и Raman исследуют структуру.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

XPS раскрывает химические состояния элементов в поверхностном слое.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Правильная интерпретация данных

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 13 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Корреляция между размером и свойством сама по себе не доказывает механизм.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Нужны контрольные образцы, повторные измерения и оценка неопределённости.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Разбор расчётного примера: Квантовая яма: изменение энергии

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Идеальная одномерная яма: $E_1 = h^2/(8m^*L^2)$; $m^* = 0{,}1m_e$.

РЕШЕНИЕ

Для L = 5 нм получаем $E_1 \approx 0{,}150$ эВ.

КАК ПОНИМАТЬ РЕЗУЛЬТАТ

При L = 10 нм энергия $E_1 \approx 0{,}0376$ эВ — в четыре раза меньше.

Итоги лекции: главные выводы

Принцип

В некоторых полупроводниковых нанокристаллах квантовое ограничение увеличивает энергию оптического...

Применение

Границы зёрен и дефекты способны изменять твёрдость и пластичность материала. Наноиндентация измеряет локальный...

Ограничения

Корреляция между размером и свойством сама по себе не доказывает механизм. Нужны контрольные образцы,...

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

Контрольные вопросы и литература

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Когда возникает квантовое ограничение?
2. Как поверхность влияет на свойства?
3. Почему нужно оценивать распределение размеров?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bhagyaraj et al. Characterization of Nanomaterials, 2018

2. Srinivasan et al. Experimental Techniques, 2024

Материалы курса, 2026

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