МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

ЛЕКЦИЯ 08

Зондовая микроскопия: AFM и STM

Измерение топографии, силового взаимодействия и туннельного тока

Кратко: Сканирующий зонд исследует локальное взаимодействие острия с поверхностью.

Цель лекции и ожидаемые результаты

Понимать

Объяснить: Принцип зондовой микроскопии. Сканирующий зонд исследует локальное взаимодействие острия с...

Сопоставлять

Объяснить: Показатели шероховатости. Параметр Sq равен среднеквадратичному отклонению высот от...

Применять

Объяснить: Обработка и архивирование данных. Сохраняют исходную карту, размер сканирования, шаг пикселя и настройки...

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

Принцип зондовой микроскопии

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 01 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Сканирующий зонд исследует локальное взаимодействие острия с поверхностью.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Полученная карта отражает свойства конкретного сигнала и режима сканирования.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Устройство атомно-силового микроскопа

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 02 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

AFM использует кантилевер с остриём, сканер и систему регистрации прогиба.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Обратная связь поддерживает заданный параметр взаимодействия.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Контактный режим AFM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 03 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

В контактном режиме острие испытывает силу при непосредственном взаимодействии с поверхностью.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

При малых прогибах силу приближённо оценивают по закону Гука.

СООТНОШЕНИЕ

$$F \approx k\delta$$



Геометрия острия меняет видимую ширину объекта.

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Динамические режимы AFM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 04 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Колебательные режимы используют изменения амплитуды, фазы или частоты кантилевера.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Они позволяют уменьшить боковые силы на мягких поверхностях.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Карта высот AFM

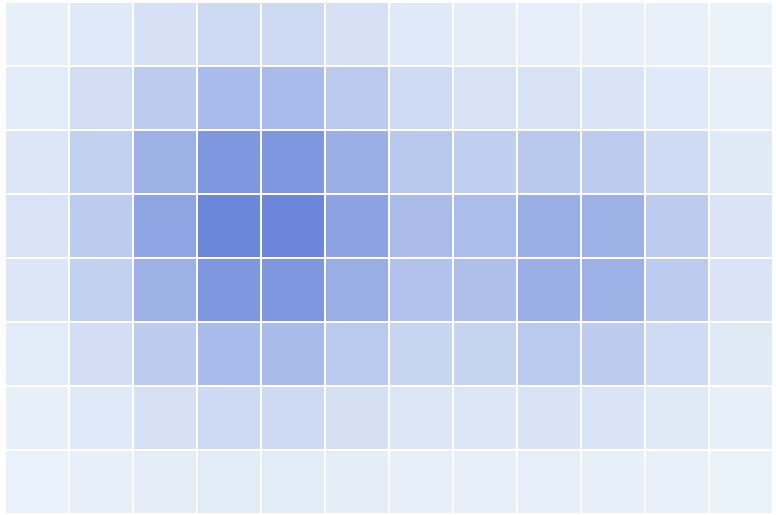
КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 05 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Топографическая карта содержит значения высоты в каждой точке сканирования.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для корректного анализа сначала устраняют наклон и дрейф фона.



AFM-карта высот: модельный пример

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость

Показатели шероховатости

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 06 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

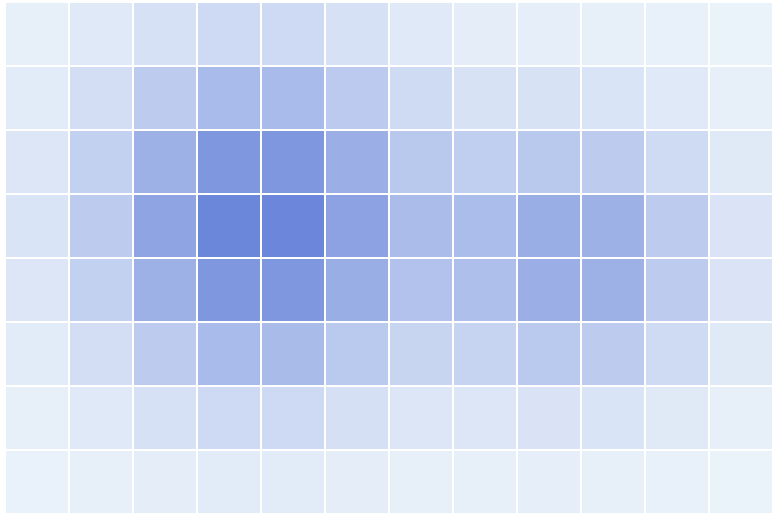
Параметр Sq равен среднеквадратичному отклонению высот от среднего уровня.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Его значение зависит от выбранной площади, разрешения и обработки данных.

СООТНОШЕНИЕ

$$Sq = \sqrt{[\Sigma(z_i - \bar{z})^2/N]}$$



AFM-карта высот: модельный пример

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Влияние формы зонда

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 07 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Конечный радиус острия приводит к уширению узких выступов на изображении.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Геометрия зонда не позволяет напрямую измерять очень узкие канавки.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



Геометрия острия меняет видимую ширину объекта.

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Кривая сила–расстояние

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 08 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

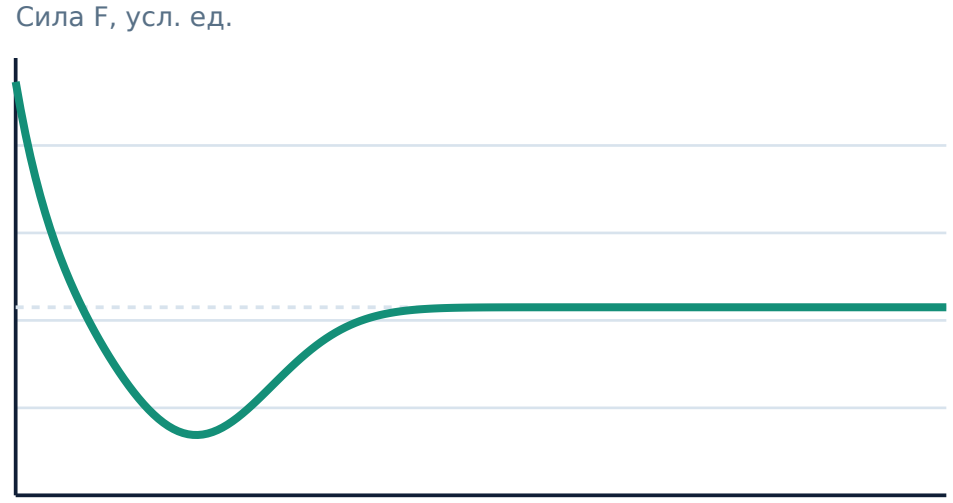
Кривые приближения и отвода показывают контакт, адгезию и упругий отклик.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

При выводе механических свойств требуется подходящая контактная модель.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



AFM: притяжение и отталкивание МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Туннелирование в STM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 09 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Туннельный ток между остриём и проводящим образцом экспоненциально зависит от зазора.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Измерение чувствительно к электронной плотности состояний, а не только к высоте.

СООТНОШЕНИЕ

$$I \propto \exp(-2\kappa z)$$

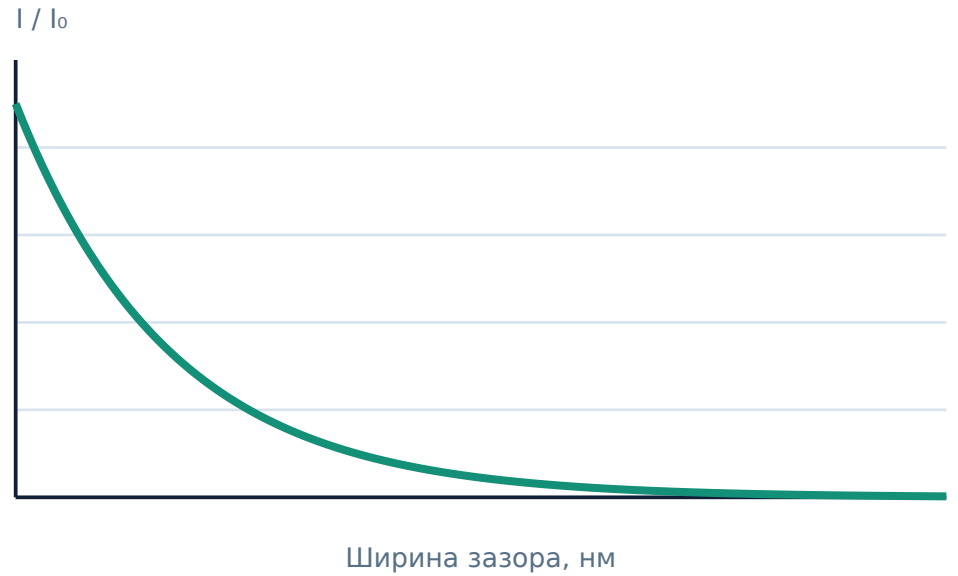


Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Режим постоянного тока STM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 10 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Система обратной связи перемещает зонд для поддержания постоянного туннельного тока.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Изменения вертикальной координаты содержат топографический и электронный вклад.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



Геометрия острия меняет видимую ширину объекта.

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Сравнение AFM и STM

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 11 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

AFM подходит и для непроводящих образцов; STM требует проводящего пути для туннельного тока.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Разрешение и интерпретация контраста зависят от режима и состояния острия.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Подготовка поверхности

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 12 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Пыль, вода и органические загрязнения создают ложные особенности рельефа.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Подготовка должна сохранять исследуемую поверхность и быть повторяемой.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Обработка и архивирование данных

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 13 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

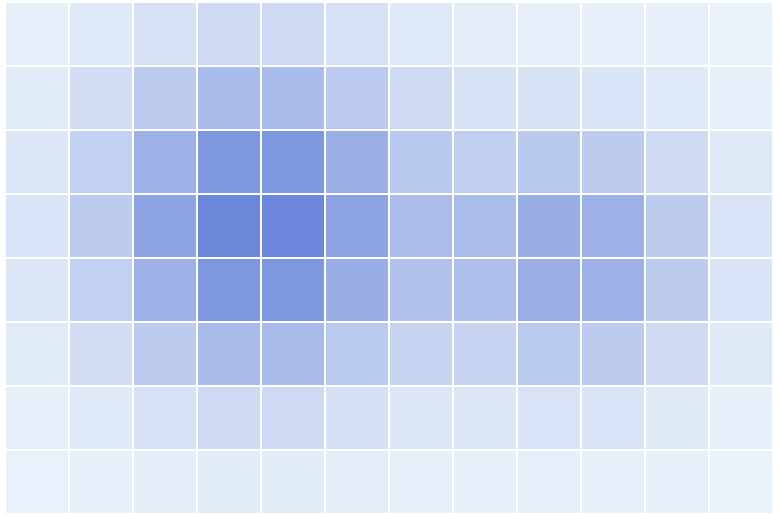
Сохраняют исходную карту, размер сканирования, шаг пикселя и настройки обратной связи.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Фильтрацию следует документировать, чтобы не принять обработку за структуру.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



AFM-карта высот: модельный пример

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Разбор расчётного примера: Среднеквадратичная шероховатость Sq

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

После выравнивания поверхности: $z_1 = -1$ нм, $z_2 = +1$ нм; $\bar{z} = 0$.

РЕШЕНИЕ

$Sq = \sqrt{[(1^2 + 1^2)/2]} = 1$ нм.

КАК ПОНИМАТЬ РЕЗУЛЬТАТ

Для реальной карты используют все пиксели выбранной области.

Итоги лекции: главные выводы

Принцип

В контактном режиме острие испытывает силу при непосредственном взаимодействии с поверхностью. При малых...

Применение

Кривые приближения и отвода показывают контакт, адгезию и упругий отклик. При выводе механических свойств требуется...

Ограничения

Сохраняют исходную карту, размер сканирования, шаг пикселя и настройки обратной связи. Фильтрацию следует...

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

Контрольные вопросы и литература

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем AFM отличается от STM?
2. Почему форма зонда влияет на измеренный размер?
3. Как вычисляется среднеквадратичная шероховатость Sq?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

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

2. Bhagyaraj et al. Characterization of Nanomaterials, 2018

Материалы курса, 2026

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