МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

ЛЕКЦИЯ 03

Методы синтеза наноматериалов

Подходы top-down и bottom-up, PVD, CVD и PECVD

Кратко: Подход top-down формирует малые структуры из объёмного материала.

Цель лекции и ожидаемые результаты

Понимать

Объяснить: Две стратегии синтеза. Подход top-down формирует малые структуры из объёмного материала.

Сопоставлять

Объяснить: Химическое осаждение CVD. В CVD твёрдая плёнка образуется за счёт химических реакций газообразных...

Применять

Объяснить: Протокол и лабораторная безопасность. Работа с вакуумом, газами, плазмой и нагревателями требует...

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

Две стратегии синтеза

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 01 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Подход top-down формирует малые структуры из объёмного материала.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Подход bottom-up строит структуры из атомных, молекулярных или кластерных компонентов.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Примеры top-down

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 02 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Литография задаёт пространственный рисунок, а травление переносит его в материал.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Измельчение позволяет получать порошки, но часто даёт широкий разброс размеров.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Примеры bottom-up

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 03 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

К bottom-up относят коллоидный синтез, осаждение из раствора и рост из газовой фазы.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Зарождение и рост определяют структуру, форму и распределение размеров.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Нуклеация и рост

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 04 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Зарождение новой фазы зависит от пересыщения и энергетического барьера.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Скорость роста определяется переносом реагентов и реакциями на поверхности.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Физическое осаждение PVD

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 05 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

В PVD материал мишени переносится к подложке преимущественно физическими процессами.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Скорость, давление и температура влияют на структуру растущей плёнки.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Химическое осаждение CVD

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 06 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

В CVD твёрдая плёнка образуется за счёт химических реакций газообразных предшественников.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Состав смеси, температура и давление определяют кинетику процесса.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Плазмохимическое осаждение PECVD

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 07 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Плазма создаёт ионы, электроны и активные радикалы, ускоряющие химические реакции.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Энергия ионной бомбардировки может влиять на дефектность и адгезию слоя.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Матрица параметров синтеза

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 08 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Независимыми параметрами могут быть температура, давление, расход газа, мощность и время.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Откликами служат толщина, шероховатость, фазовый состав и функциональные свойства.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Скорость роста плёнки

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 09 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

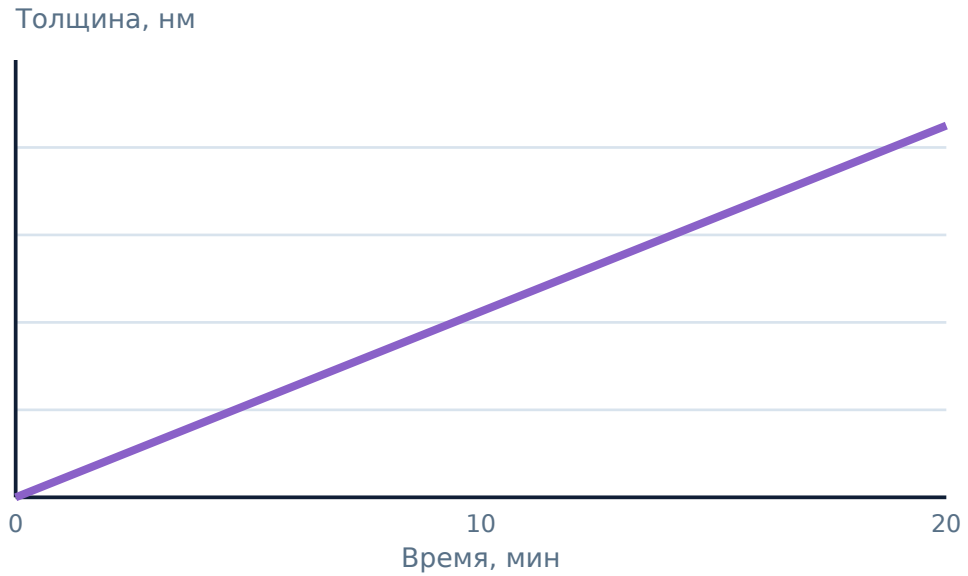
При постоянной скорости осаждения толщина увеличивается пропорционально времени.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для начальной стадии нуклеации линейное приближение может не выполняться.

СООТНОШЕНИЕ

h = vt (если v = const)



h = v·t (постоянная v)

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Подготовка подложки

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 10 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Чистота и шероховатость подложки влияют на зарождение, адгезию и рост.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Процедуру очистки нужно фиксировать и одинаково применять ко всем образцам.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Контроль качества после синтеза

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 11 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Морфологию проверяют электронной или зондовой микроскопией, а фазы — дифракцией.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Химические связи и состояния поверхности уточняют спектроскопией.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Источники воспроизводимости

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 12 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Колебания давления, температуры и потока газов приводят к межсерийным различиям.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Необходимы калибровка датчиков, журнал параметров и повторяемые опыты.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Протокол и лабораторная безопасность

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 13 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

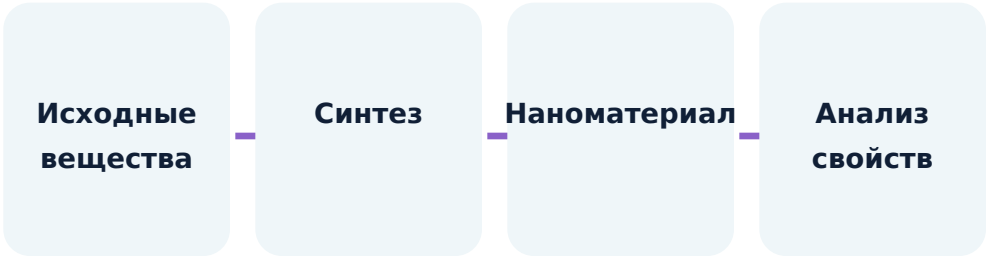
Работа с вакуумом, газами, плазмой и нагревателями требует регламентированных процедур.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Описание последовательности операций облегчает воспроизведение результата.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Разбор расчётного примера: Средняя скорость роста плёнки

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Пусть рост равномерен: h = vt; v = 3 нм/мин, t = 20 мин.

РЕШЕНИЕ

h = 3 × 20 = 60 нм.

КАК ПОНИМАТЬ РЕЗУЛЬТАТ

При наличии стадии зарождения линейную модель нужно проверять измерениями.

Итоги лекции: главные выводы

Принцип

К bottom-up относят коллоидный синтез, осаждение из раствора и рост из газовой фазы. Зарождение и рост…

Применение

Независимыми параметрами могут быть температура, давление, расход газа, мощность и время. Откликами служат…

Ограничения

Работа с вакуумом, газами, плазмой и нагревателями требует регламентированных процедур. Описание…

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

Контрольные вопросы и литература

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем top-down отличается от bottom-up?
2. Какие параметры управляют ростом в PECVD?
3. Как проверить воспроизводимость синтеза?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Hussain. Handbook of Functionalized Nanomaterials, 2020

2. Srinivasan et al. Experimental Techniques, 2024

Материалы курса, 2026

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