

Лекция 12: Техники наноизготовления

Цель лекции - предоставить студентам полное понимание техник наноизготовления, включая методы верхней и нижней нанообработки, литографию и самосборку. Мы рассмотрим, как эти методы революционизируют процесс создания наноструктур и наноустройств с высокой точностью и контролем. Студентам будет представлена информация о современных методах наноизготовления и их критической роли в наноэлектронике и нанотехнологиях.

Результаты обучения:

По окончании этой лекции студенты должны:

- Понимать разнообразие методов верхней и нижней нанообработки и их роль в создании наноструктур.
- Знать процессы фотолитографии, электронной литографии, ионной имплантации и химического осаждения.
- Понимать, как литография и самосборка используются для создания наноструктур и наноустройств.
- Осознавать важность техник наноизготовления в наноэлектронике и нанотехнологиях

Часть 1: Методы верхней нанообработки

Метод верхней нанообработки (МВН) или верхнее литографическое сканирующее зондовое микроструктурирование - это техника, используемая для создания наноструктур на поверхности материалов с использованием сканирующего зондового микроскопа. В этом методе, наномасштабная структура создается путем нанесения, вырезания или модификации поверхности материала.

Техника верхней нанообработки часто осуществляется с использованием зондового микроскопа с атомно-острым зондом. Зонд подносится к поверхности материала, и с помощью различных методов, таких как атомно-силовая микроскопия (АСМ), сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) или электронная литография, зонд наносит, вырезает или модифицирует материал на наномасштабном уровне.

Основные принципы метода верхней нанообработки:

Сканирование и контроль:

Зонд сканирует поверхность, обнаруживая её топографию и структуру.

Нанесение и модификация:

Зонд может использоваться для нанесения или модификации материала на поверхности путем удаления или добавления атомов или молекул.

Вырезание:

Зонд также может использоваться для точного вырезания материала или создания наноструктур с определенной формой и размером.

Формула для туннельного тока в СТМ:

В сканирующей туннельной микроскопии туннельный ток I между зондом и образцом может быть выражен следующим образом:

$$I \propto e^{-2kd}$$

где:

I - туннельный ток.

d - расстояние между зондом и поверхностью.

k - коэффициент затухания в потенциальном барьере.

Формула для взаимодействия в АСМ:

В атомно-силовой микроскопии сила взаимодействия F между зондом и образцом может быть описана формулой:

$$F = k z$$

где:

F - сила взаимодействия.

k - жесткость пружины зонда.

z - расстояние между зондом и образцом.

Эти формулы представляют основные принципы и связанные с ними величины в сканирующих методах, используемых в верхней нанообработке. Они позволяют оценить взаимодействие между зондом и образцом, а также ток, проходящий через потенциальный барьер при туннельном эффекте.

Некоторые этапы в МВН:

Фотолитография - один из фундаментальных методов наноизготовления, который позволяет создавать микросхемы и наноструктуры. Процесс фотолитографии включает следующие этапы:

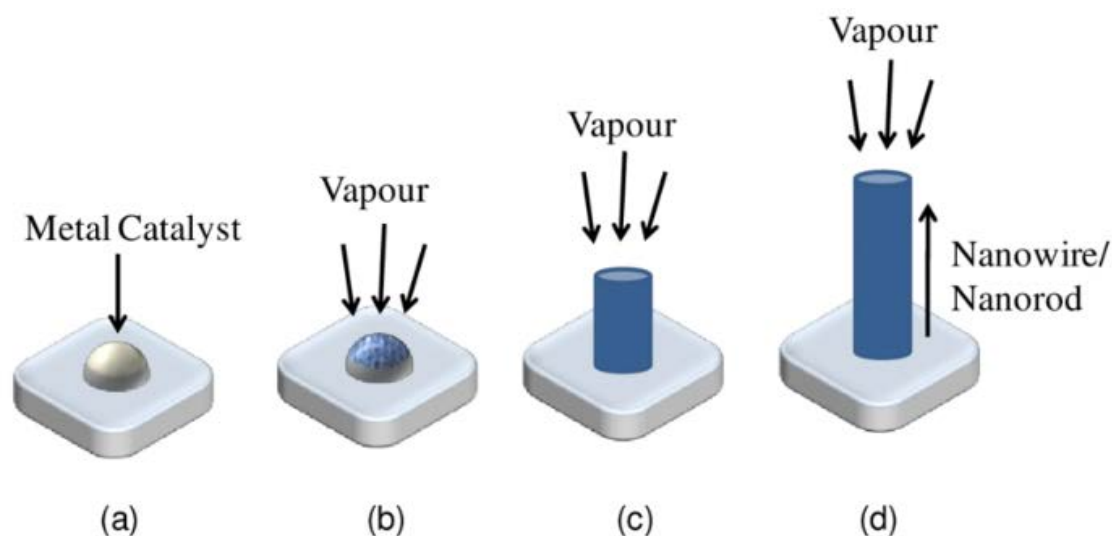
Подготовка подложки: Подложка (часто кремний) подвергается специальной обработке для создания слоя фоточувствительного материала.

Нанесение фоточувствительного слоя: На подложку наносится тонкий слой фоточувствительного полимера.

Экспозиция: С использованием ультрафиолетового света и маски происходит передача узора на фоточувствительный слой.

Разработка: Ненужные области фоточувствительного слоя удаляются, обнажая подложку.

Травление: Подложка обрабатывается, чтобы создать углубления или выступы по узору.

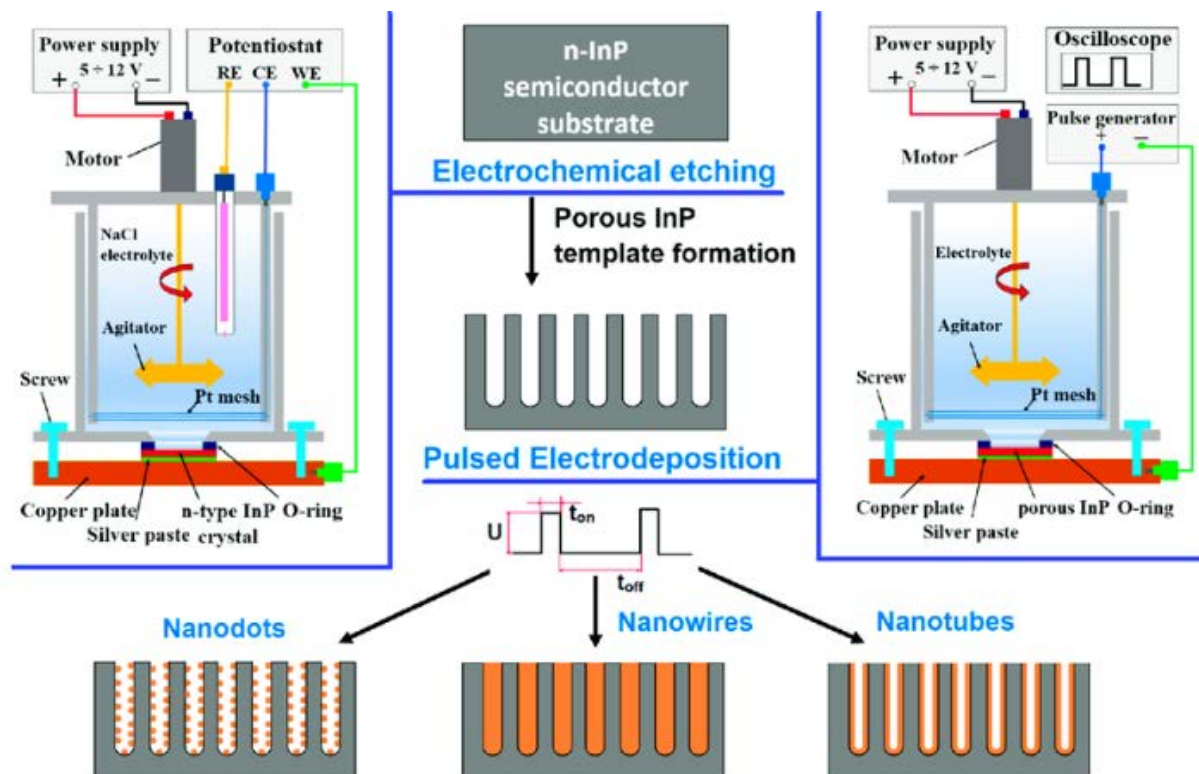


Схематическая иллюстрация основных этапов метода выращивания МВН: от первоначального зарождения до непрерывного роста

Электронная литография использует пучок электронов для создания наноузоров на поверхности материала. Этот метод обладает высокой разрешающей способностью и позволяет создавать наноструктуры с высокой точностью.

Часть 2: Методы нижней нанобработки

Методы нижней нанобработки, в отличие от методов верхней нанобработки (МВН), направлены на создание наноструктур путем удаления или изменения материала из объема. Нижняя нанобработка обычно включает в себя методы и техники, такие как ионно-лучевая обработка, химическое травление, фокусированное ионное облучение (ФИО), реактивная и механическая атака и другие.



Схематическое изображение установки для электрохимического травления полупроводниковых подложек, а также импульсного электрохимического осаждения металлических наноструктур в пористые полупроводниковые шаблоны. Представлена технологическая схема работы для кристаллов InP.

Формулы в методах нижней нанобработки могут быть специфичны в зависимости от используемого метода. Например, в химическом травлении может использоваться химическая реакция для растворения или удаления материала, а ионно-лучевая обработка применяет ионы для удаления или модификации поверхности.

Здесь представлены некоторые принципы и возможные формулы, используемые в нижней нанобработке:

Химическое травление:

В зависимости от реакции, протекающей в химическом травлении, могут использоваться различные химические уравнения для описания процесса удаления материала из объема.

Ионно-лучевая обработка:

Энергия ионы влияют на глубину проникновения в материал. Формула, описывающая этот процесс, может зависеть от типа ионов и энергии.

Фокусированное ионное облучение (ФИО):

ФИО обычно использует ионы галлия для удаления материала. Здесь применяются различные формулы, описывающие отношение энергии и глубины обработки.

Механическая атака:

В методах механической атаки применяются механические силы для удаления материала. Здесь могут использоваться законы физики, описывающие влияние силы и напряжения на материал.

Часть 3: Литография и самосборка

Литография и самосборка - это методы, используемые в нанотехнологиях для создания микро- и наноструктур на поверхности материалов.

Литография - это техника создания микро- и наноструктур путем применения светочувствительного материала (резиста) на поверхность подложки (обычно кремния) с последующим воздействием света или электронов через маску. Это позволяет создавать шаблоны, необходимые для интегральных схем, датчиков, микроэлектромеханических систем (MEMS) и других наноэлектронных устройств.

Шаги литографии:

Покрытие резиста: Нанесение резиста на поверхность подложки.

Экспозиция: Воздействие света (фотолитография) или электронов (электронная литография) через маску на резист.

Разработка: Процедура удаления части резиста, создавая паттерн, соответствующий маске.

Этапы травления или напыления: Применение химической обработки для изменения свойств материала.

В фотолитографии используется формула для определения минимально разрешимого размера шаблона R :

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

где:

k_1 - коэффициент, зависящий от технологии и оборудования.

λ - длина волны света.

NA - числовая апертура объектива.

Самосборка - это процесс, при котором молекулы, наночастицы или другие элементы самостоятельно организуются в определенные структуры без внешнего вмешательства. Этот процесс основан на внутренних физических или химических взаимодействиях элементов.

Применения самосборки:

Самосборка используется для создания наноструктур с определенными свойствами, таких как кристаллические структуры, суперструктуры, или функциональные покрытия.

Оба метода, литография и самосборка, играют ключевую роль в создании наноструктур и развитии нанотехнологий.



Схема литографически-индуцированной самосборки (ЛИС).

Заключение:

Техники наноизготовления играют ключевую роль в создании наноструктур и наноустройств с высокой точностью и контролем. Они позволяют разрабатывать новые нанотехнологии и усовершенствовать существующие, что открывает перспективы для инноваций в нанoeлектронике и других областях науки и техники.