

# Основы технологии систем пониженной размерности

Случинская И. А., доцент, к.ф.-м.н., кафедра физики полупроводников

## Тема 1. Эпитаксия. Методы эпитаксии.

Методы жидкостной эпитаксии.

Эпитаксия из газообразной фазы: метод химических реакций, газотранспортная эпитаксия.

Конденсация из паровой фазы. Метод «горячей стенки».

## Тема 2. Требования к технологии получения квантовых наноразмерных структур на основе гетеропереходов.

Химические аналоги. Близость постоянных решетки. Резкость гетерограницы.

## Тема 3. Традиционные методы получения тонких пленок.

*Химическое осаждение из газовой фазы.* Используемые физико-химические процессы. Методы получения соединений  $A^{III}B^V$ . Хлоридный метод. Хлоридно-гидридный метод.

## Тема 4. Рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений.

Преимущества. Химические превращения на нагретой поверхности подложки.

Кинетика роста эпитаксиальной пленки. Формирование резких границ раздела.

*Химическое осаждение из газовой фазы при пониженном давлении.*

*Химическое осаждение из газовой фазы, стимулированное газоразрядной плазмой.*

## Тема 5. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Преимущества. Эффузионные ячейки.

Распределение потоков в молекулярном пучке.

Кинетические процессы конденсации. Температура подложки. Поверхностная диффузия. Остаточные газы. Подложка.

Химические превращения на поверхности подложки (на примере GaAs). Легирование. Контроль за процессом роста. Методы диагностики.

## Тема 6. Наноформирование.

*Метод изготовления нанотрубок самосворачиванием полупроводниковых гетерослоев.* Напряженные гетероструктуры. Нанотрубки. Основные достоинства метода формирования свернутых гетероструктур.

*Формирование полупроводниковых и металлических нановолокон и спиралей.*

*Наногофрированные структуры.*

## Тема 7. Методы получения наноразмерных структур, основанные на использовании сканирующих зондов.

*Общие принципы работы сканирующих зондовых микроскопов.* Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ). Атомная силовая микроскопия (АСМ).

*Физические основы зондовой нанотехнологии.* Эффект полевой (автоэлектронной) эмиссии. Локальный разогрев. Локальная полевая пластическая деформация. Пондеромоторные объемные силы. Полевое испарение (массоперенос). Поляризационные эффекты и модификация среды в зазоре.

*Атомная инженерия.* Параллельные процессы переноса атомов (полевая диффузия, скольжение). Перпендикулярные процессы переноса (контактный перенос, полевое испарение, электромиграция).

*Методы зондовой нанотехнологии.* Метод полевого испарения (межэлектродный массоперенос). Термополевой массоперенос. Метод локального химического осаждения из газовой фазы. Метод осаждения из жидкости (электрохимический массоперенос). Локальное окисление металлов и полупроводников. Механический метод. Метод полевой нанодеформации. Локальная глубинная модификация поверхности. Метод изменения фазового состава.

## Тема 8. Методы нанолитографии.

*Фотолитография.* Основные этапы. Предельная разрешающая способность оптических устройств. Дифракционный критерий Рэлея. Иммерсионная литография.

**Рентгеновская литография.** Установка. Шаблоны. Резисты. Источники. Достоинства. Недостатки.

**Электронно-лучевая литография.** Проекционные системы. Сканирующие системы. Система с точной передачей изображения. Система с уменьшением изображения. Лучевые сканирующие системы. Эффекты близости. Резисты. «Взрывная» литография. Достоинства и недостатки.

**Ионная литография.** Проекционная ионная литография. Ионно-лучевая литография.

**Плазменное («сухое») травление.**

**Зондовая нанолитография.**

Электронная (токовая) и механическая(силовая) модификации резистивных пленок.

Прямое нанесение рисунка с помощью СТМ (автоэмиссионный метод). Формирование рисунка в слое металла, полученного разложением металлоорганического соединения. Литография с использованием резиста. Совместное использование лазера и СТМ в нанолитографии. Термомеханическая нанолитография. Перьевая нанолитография.

**Нанопечать.** Нанопечать с использованием молекулярных «чернил». Наноимпринт с использованием термопластика. Нанопечать с УФ-полимеризацией мономера. Последовательность процессов «печать и повтор». Достоинства импринт-литографии.

**Сравнение нанолитографических методов.**

Тема 9. Саморегулирующиеся процессы.

**Самосборка.**

**Самоорганизация в объемных материалах.**

Спонтанная кристаллизация. Золь–гель-технология. Кластерное осаждение. Ионная имплантация.

Тема 10. Формирование структур на основе коллоидных растворов.

Тема 11. Самоорганизация квантовых точек и нитей при эпитаксии.

**Режимы роста гетероэпитаксиальных структур:** Франка-ван дер Мерве, Фольмера-Вебера, Странского-Крастанова.

**Типы наноструктур, получаемых с использованием эффектов самоорганизации.**

**Выращивание наноструктур на микроскопически упорядоченных фасетированных поверхностях.**

**Выращивание трехмерных массивов когерентно напряженных островков в гетероэпитаксиальных рассогласованных системах.** Механизм формирования трехмерных островков. Экспериментальные данные. Многослойные массивы квантовых точек.

**Выращивание поверхностных структур плоских упругих доменов.** Многослойные массивы островков монослойной высоты.

**Выращивание наноструктур с периодической модуляцией состава в эпитаксиальных пленках твердых растворов полупроводников.**

## Основная литература

1. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
2. Случинская И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. М.: МИФИ, 2002.
3. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Данилюк А.Л., Уткина Е.А. Наноэлектроника: теория и практика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013.
4. Данилина Т.И., Чистоедова И.А. Оборудование для создания и исследования свойств объектов наноэлектроники. В-Спектр, Томск, 2011.
5. Киреев В.Ю. Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография: процессы и оборудование. М.: Издательский дом «Интеллект», 2016.
6. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.