

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников высшей школы по направлению
«Физические основы нанотехнологий»
на базе учебного курса
«Введение в нанотехнологии»

Цель: изучение физических принципов технологии атомно-слоевого осаждения тонких плёнок

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 24 часа

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление слушателей с основными типами наноструктур, их отличительными характеристиками, методами получения и возможными областями применения с целью подготовки к детальному изучению предмета в рамках дальнейших специализированных курсов лекций.

Требования к уровню освоения учебного курса

Преподаватели и научные сотрудники должны:

- Знать:
 - классификацию наноструктур, различные типы нанообъекты: коллоидные системы, нанопорошки, полупроводниковые гетероструктуры, квантовые точки, проволоки, ямы.
 - области применения наноструктур;
 - основы эпитаксиальных процессов;
 - основы литографических процессов.
- Иметь навыки:
 - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области физических основ нанотехнологий;
 - включать приобретенные знания о физических основах нанотехнологии в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
 - переносить полученные знания о физических основах нанотехнологий на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
 - о методах получения нанопорошков;
 - о способах создания полупроводниковых наноструктур;
 - о возможных механизмах эпитаксиальных процессов;

Учебный курс «Введение в нанотехнологии» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к

проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в НИЯУ МИФИ.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса даются начальные сведения о терминологии в области нанотехнологий. Рассматриваются различные нанообъекты: коллоидные системы, нанопорошки, полупроводниковые гетероструктуры, квантовые точки, проволоки, ямы. Обсуждаются методы получения наноструктур различных типов. Излагаются основы эпитаксиальных и литографических процессов. Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций:

Лекция №1. Нанотехнологии: терминология, краткая история возникновения и развития. Виды наноструктур. Классификация наноструктур по их мерности.

Место наноразмерных объектов в окружающем нас мире. Что такое нанотехнологии. Применение нанотехнологий в технике. Наноиндустрия. Основные термины и определения. История нанотехнологий. Эволюция электроники. Естественные границы развития существующей микроэлектроники и переход к нанoeлектронике. Создание объектов по принципам "сверху-вниз" и "снизу-вверх". Манипуляции на квантовом уровне. Подходы «снизу в вверх» и «сверху вниз». Низкоразмерные физические системы. Квантовая механика – основа физики наноразмерных структур. Типы и виды наноструктур. Одно-, двух- и трех- мерные наноструктур. Квантовые ямы, проволоки, точки. Кластерные кристаллы, фуллерены и фуллериты. Тонкие наноструктурированные пленки. Углеродные нанотрубки. Природные неорганические наноматериалы. Наноструктуры в живой природе (вирусы, микробы, бактерии). Ультрадисперсные и нанодисперсные системы (порошки, материалы, среды).

Лекция №2. Наноструктуры: производство и применение нанопорошков

Механические методы получения нанопорошков, достоинства и недостатки. Диспергирование, спиннингование. Физико-химические методы получения нанопорошков. Вакуумное осаждение. Лазерная абляция. Золь-метод. Плазмохимический метод. Восстановление. Применение нанопорошков: оксиды, чистые материалы, смеси и сложные материалы.

Лекция №3. Полупроводниковые наноструктуры. Гетеропереходы. Свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$

Проводники, диэлектрики. полупроводники. Классификация. Собственные и примесные полупроводники. Полупроводниковые материалы. Определение. Классификация полупроводников по составу и свойств. Полупроводники органические и неорганические, кристаллические и аморфные, магнитные и немагнитные, элементы, химические соединения, химические растворы. Ширины запрещенных зон элементарных полупроводников. Германий и кремний: получение, физико-химические свойства, выращивание монокристаллов. Карбид кремния, получение физико-химические свойства и применение. Бинарные полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$. Кристаллическая структура и химическая связь. Нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды. Физико-химические свойства. Примеси и дефекты структуры. Мелкие доноры и акцепторы. Глубокие доноры и акцепторы. Рекомбинация носителей заряда. Получение монокристаллов и эпитаксиальных слоев. Применение полупроводниковых соединений. Твердые растворы на основе соединений $A^{III}B^V$. Возможность плавного управления шириной запрещенной зоны тройных соединений путем изменения их компонентного состава. Свойства полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$. Понятие гетеропереходов. Гетеропереходы на основе полупроводников. Дельта легирование.

Лекция №4. Эпитаксиальные процессы. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

Понятие эпитаксии. Физические основы процесса эпитаксии. Соизмеримость решеток. Параметр несоответствия кристаллических решеток. Когерентная граница раздела.

Влияние подложки. Методы проведения эпитаксии. Конденсация из паровой фазы в вакууме. Испарение и нагрев подложки электронной бомбардировкой. Метод молекулярных пучков. Сублимация. Катодное распыление. Кристаллизация из газовой фазы. Плазменное (магнетронное) осаждение. Жидкофазная эпитаксия. Твердофазная эпитаксия. Методы, стимулирующие эпитаксию. Контроль параметров эпитаксиальных слоев. Лазерное осаждение эпитаксиальных слоев. Формирование факела. Расположение подложек относительно факела. Применение затемняющих экранов. Требования к лазерам, применяемым для проведения эпитаксии. Импульсные лазеры, мощность, скважность импульса. Требования к вакуумным установкам. Контроль скорости осаждения, температуры подложки. Особенности лазерного напыления на различные подложки. Получение неэпитаксиальных слоев. Островковое (кластерное) осаждение. Методики синтеза захороненных кластеров. Особенности напыления многокомпонентных материалов. Послойное осаждение различных материалов. Определение молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Особенности МЛЭ по сравнению с другими методами проведения эпитаксии. МЛЭ с применением твердофазных источников. МЛЭ с применением газофазных источников. Схема установок МЛЭ. Устройство молекулярных источников (эффузионных ячеек). Физические условия проведения процессов молекулярно-лучевой эпитаксии. Диапазон рабочих давлений для различных эпитаксиальных систем. Описание ростового процесса. Основные этапы ростового процесса. Параметры, определяющие процесс эпитаксиального наращивания. Коэффициент прилипания. Роль температуры подложки в кинетике процесса. Критическая температура эпитаксии. Параметры, определяющие интенсивность молекулярных потоков. Методы измерения интенсивности молекулярных потоков. Расчет скорости поступления веществ на подложку из данных по давлению паров. Необходимые вакуумные условия для осуществления процесса МЛЭ. Легирование. Фоновые примеси. Контроль концентрации легирующих примесей. Ростовые дефекты. Антиструктурные дефекты. Дислокации несоответствия и термическое расширение. Методики, применяемые для анализа эпитаксиальных слоев: масс-спектрометрия, дифрактометрия электронов высоких и средних энергий, электронная оже-спектроскопия.

Лекция №5. Основы литографических процессов.

Классификация литографии в зависимости от длины волны. Сущность фотолитографии и основные процессы. Фоторезисты. Негативные и позитивные фоторезисты. Основы формирования рельефного изображения. Важнейшие параметры фоторезистов: светочувствительность, разрешающая способность, стойкость к воздействию агрессивных факторов, стабильность эксплуатационных свойств. Спектры поглощения и характеристические кривые. Способы нанесения фоторезиста на подложку. Способы переноса изображений. Электронно-лучевая литография. Преимущества электронно-лучевой литографии. Структурная схема электронно-лучевой установки. Электронорезисты. Характеристики позитивных и негативных электронорезистов. Методы электронно-лучевого экспонирования. Шаблоны для электронно-лучевой литографии. Рентгеновая литография. Схема рентгеновской литографии. Чувствительность рентгенорезистов. Маски для рентгенолитографии. Применение синхротронного излучения для литографических процессов. Ионно-лучевая и голографическая литография. Ионные источники. Экспонирование коллимированным ионным пучком. Экспонирование острофокусированным пучком. Получение ионной проекции изображения. Использование радиационных дефектов. Процессы травления в литографии. Современные нанолитографы. Наноимпринт-литография. Формирование электрических контактов.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в выполнении четырех лабораторных работ:

Лабораторная работа 1 "Исследование параметров структур с квантовыми ямами вольт-фарадным методом."

Лабораторная работа 2 "Вольт-амперная характеристика резонансно-туннельного диода"

Лабораторная работа 3. «Получение изображений в сканирующем силовом микроскопе».

Лабораторная работа 4. «Получение изображений в сканирующем туннельном микроскопе».

Лабораторная работа 5. «Цифровая обработка и количественный анализ изображения поверхности в сканирующем зондовом микроскопе».

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 12 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу **«Введение в нанотехнологии»**

Лекция 1: Нанотехнологии: терминология, краткая история возникновения и развития. Виды наноструктур. Классификация наноструктур по их мерности.

1. Что означает приставка «нано-»?

А) 10^{-6}

Б) 10^{-10}

В) 10^{-9}

Г) 10^{-12}

Ответ:

2. Тонкая пленка это:

А) Одномерная наноструктура

Б) Трехмерная наноструктура

В) Двухмерная наноструктура

Г) Нульмерная наноструктура

Ответ:

3. В тонкой пленке квантование электронного спектра наблюдается в

А) Одним направлением

Б) В трех направлениях

В) В двух направлениях

Г) не наблюдается

Ответ:

4. При увеличении ширины квантовой ямы в 2 раза, значение энергии квантового уровня:

А) Увеличится в 2 раза

Б) Уменьшится в 2 раза

В) Увеличится в 4 раза

Г) Уменьшится в 4 раза

Ответ:

Лекция 2: Наноструктуры: производство и применение нанопорошков

1. Диспергирование – это способ получения наночастиц, относящийся к:

А) механическим способам

Б) лазерной абляции

В) химическим способам

Г) вакуумному осаждению

Ответ:

2. Наиболее простой путь получения нанопорошков?

А) механический

Б) вакуумное осаждение

В) лазерная абляция

Г) плазмохимия

Ответ:

3. Наиболее распространены нанопорошки?

- А) нитридов
В) оксидов
Б) карбидов
Г) силицидов

Ответ:

4. Наиболее дешевый метод получения высокочистых нанопорошков?

- А) механический
В) вакуумное осаждение
Б) восстановление
Г) плазмохимия

Ответ:

Лекция 3: Полупроводниковые наноструктуры. Гетеропереходы. Свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$

1. Для создания квантовой ямы требуется?

- А) один полупроводник
В) три полупроводника
Б) два полупроводника
Г) четыре полупроводника

Ответ:

2. При увеличении значения x в $Al_xGa_{1-x}As$ величина ширины запрещенной зоны?

- А) не изменяется
В) уменьшается
Б) увеличивается
Г) сначала увеличивается, затем уменьшается

Ответ:

3. Соединения $A^{III}B^V$ классифицируют по элементу ?

- А) второй группы
В) третьей группы
Б) четвертой группы
Г) пятой группы

Ответ:

4. Частичная замена мышьяка на кремний в арсениде алюминия приводит к появлению?

- А) дырочного типа проводимости
В) электронному типу проводимости
Б) проводимость не меняется
Г) сначала к дырочному, затем к электронному типу проводимости

Ответ:

Лекция 4: Эпитаксиальные процессы. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

1. Процесс, при котором наблюдается ориентированный рост слоев, кристаллическая решетка которых повторяет структуру подложки – это:

- А) адсорбция
В) абсорбция
Б) испарение
Г) эпитаксия

Ответ:

2. Какой процесс отсутствует в ходе эпитаксиального роста?

- А) адсорбция атомов и молекул на нагретой поверхности подложки
В) механическое диспергирование молекул на нагретой подложке
Б) миграция атомов и молекул по поверхности и диссоциация адсорбированных молекул
Г) встраивание атомов в наиболее энергетически выгодные места в кристаллической решетке подложки

10. Почему некоторые атомные кластеры относят как к нульмерным, так и к одномерным наноструктурам?
11. Существуют ли трехмерные наноструктуры?
12. Приведите примеры одномерных и двумерных наноструктур.
13. Каков наиболее простой путь получения нанопорошков? На чем основан этот метод?
14. В чем недостаток механического метода?
15. В чем суть метода диспергирования расплавов потоком жидкости или газа?
16. Перечислите основные физико-химические методы получения нанопорошков.
17. Для синтеза каких нанопорошков наиболее подходит плазмохимический метод?
18. Приведите характерные примеры применения нанопорошков.
19. Каково характерное значение запрещенной зоны в полупроводниках?
20. В чем заключается идеология создания полупроводниковой квантовой ямы?
21. Можно ли менять ширину запрещенной зоны в одном полупроводнике?
22. Приведите примеры соединений-партеров на основе нитридов, антимоноидов, арсенидов?
23. Какие элементы являются донорами для арсенида галлия?
24. Приведите пример тройного соединения на основе антимоноидов.
25. В чем суть дельта-легирования?
26. Какие признаки эпитаксиального роста пленочных структур?
27. На чем основан метод молекулярно-лучевой эпитаксии?
28. Перечислите элементарные процессы в зоне роста.
29. В чем физическая суть критической температуры эпитаксии.
30. Каковы особенности молекулярно-лучевой эпитаксии?
31. Типы литографии и пространственное разрешение.
32. Из каких основных этапов состоит литографический процесс?
33. Особенности электронно-лучевой, рентгеновской и ионной литографии.
34. Перечислить основные свойства резистов.
35. В чем особенности литографического метода наноимпринт?

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

Темы контрольных рефератов по курсу
«Введение в нанотехнологии»

1. Методы определения размеров наночастиц.
2. Методы получения нанодисперсных частиц.
3. Методы получения самоорганизованных Si-Ge структур.
4. Формирование наноразмерных структур при ионном распылении поверхности полупроводников.
5. Оптические свойства квантоворазмерных структур Si-Ge.
6. Фотоэлектрические свойства квантоворазмерных структур Si-Ge.
7. Нанокристаллы кремния.
8. Перспективы кремниевой технологии.
9. Неуглеродные нанотрубки.
10. Электронные приборы на наноструктурах.
11. Полупроводниковые сверхрешетки.
12. Лазеры на квантовых точках.
13. Запасание энергии с помощью нанокластеров.
14. Углеродные нанотрубки как резервуары для хранения водорода.
15. Спинтроника.

16. Наномашины.

17. Ферромагнетизм в наноструктурах.

Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Введение в нанотехнологии»	24 ч.	10 ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка) Реферат
1.	Лекция 1: Нанотехнологии: терминология, краткая история возникновения и развития. Виды наноструктур. Классификация наноструктур по их мерности.		2 ч.			
2.	Лекция 2: Наноструктуры: производство и применение нанопорошков		2 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3: Полупроводниковые наноструктуры. Гетеропереходы. Свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$		2 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4: Эпитаксиальные процессы. Молекулярно-лучевая эпитаксия.		2 ч.	0,5 ч.		
	Лекция 5: Основы литографических процессов.		2 ч	0.5 ч		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы (электронная зачётка)	Реферат	

**Список литературы (основной и дополнительной),
а также других видов учебно-методологических материалов и пособий,
необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных
дисков и др.).**

**Список литературы
и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 9.**

1. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; пер. с яп. - М. : Бином. Лаборатория знаний, 2005. - 134 с.
2. Дж.М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф.Агулло-Руеда. Нанотехнологии для микро и оптоэлектроники. М.: Техносфера, 2007.
3. Ч. Пул-мл., Ф.Оуэнс .Нанотехнологии. 3-е издание. М.: Техносфера, 2007.
4. Н.Герасименко, Ю.Пархоменко. Кремний – материал для наноэлектроники. М.: Техносфера, 2007.
5. В. К. Неволин Зондовые нанотехнологии в электронике. - М. : Техносфера, 2005. - 147 с.
6. Feinman R. There's plenty of room at the bottom. An invitation to enter a new field of physics. – Miniaturization / edited by Н. D. Hilbert, Reinhold, N.Y., USA, 1961. (русский перевод А. В. Хачояна смотри: Р. Ф. Фейнман. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики. – Российский химический журнал. Перспективы нанотехнологии, том XLVI, № 5, 2002, с. 4–6).
7. Врублевский Э., Киреев В., Недзвецкий В., Сосновцев В. Нанотехнология – путь в будущее или бренд для финансирования. – Нано- и микросистемная техника, 2007, № 12, с. 6–20.
8. Нанотехнологии в электронике. / Под ред. Ю.А. Чаплыгина – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
9. Kraus T., Malaquin L., Schmid H. et al. Nanoprinting – printing with single-particle resolution – Nature Nanotechnology, 2007, vol. 2, No 9, p. 570–576.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части
учебного курса на сайте www.nanoobr.ru**