

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных
работников высшей школы по направлению
«Наноинженерия»
на базе учебного курса
«Технологические процессы в наноинженерии»

Цель: Ознакомить и обучить студентов современным технологиям производства объектов наноинженерии и применяемым для этих целей технологическим оборудованием, методам проектирования и контроля качества, а также сформировать у них интерес к данной области науки и техники и устойчивую мотивацию к самообразованию

Категория слушателей: студенты, обучающиеся по программе бакалавра/магистра

Срок обучения: 36 часов(18 очная, 18 заочная)

Форма обучения: Дистанционно-очная

Режим занятий: 6 часов в день – 3 дня с отрывом от работы

Задачами данного курса является изучение:

- существующих технологических процессов производства объектов наноинженерии и используемого для этих целей технологического оборудования;
- существующих методов контроля качества технологических процессов наноинженерии;
- электрофизических и физико-химических свойств полупроводниковых и иных материалов, применяемых при формировании объектов наноинженерии;
- физико-химических процессов, протекающих в технологических операциях цикла производства объектов наноинженерии;
- разновидностей технологических процессов, применяемых для производства объектов наноинженерии;
- перспектив развития технологических процессов, применяемых для производства объектов наноинженерии.

Требования к уровню освоения учебного курса

Студенты должны:

- Знать:
 - Электрофизические и физико-химические характеристики полупроводниковых и иных материалов, применяемых при формировании объектов наноинженерии;
 - Физико-химические процессы, сопровождающие операции технологических циклов производства объектов наноинженерии;
 - Существующие технологические маршруты производства объектов наноинженерии;
 - Специфику выполнения базовых технологических процессов формирования объектов наноинженерии: эпитаксии, избирательного легирования,

- литографии, напыления пленок, химической и ионно-плазменной обработки;
- Особенности устройства и применения, а также технические характеристики существующего технологического оборудования, применяемого для производства объектов нанотехнологии;
 - Принципы и методики расчета технологических режимов операций технологического процесса производства объектов нанотехнологии;
 - Методы контроля технологических параметров и качества формируемых структур для микро- и наносистемной техники.
- Уметь:
 - Проектировать маршрутные технологии изготовления объектов микро- и наносистемной техники;
 - Рассчитывать режимы выполнения технологических операций и выбирать технологическое оборудование для их реализации;
 - Анализировать связи технологических режимов с конструктивными и электрофизическими параметрами формируемых структур;
 - Контролировать параметры технологических процессов и характеристики формируемых структур;
 - Проектировать тестовые измерительные структуры, необходимые для контроля качества технологического процесса формирования объектов нанотехнологии;
 - Иметь навыки:
 - Разработки маршрутной технологии изготовления объектов нанотехнологии в виде интегральных микросхем;
 - Расчета режимов выполнения технологических операций диффузии и ионной имплантации;
 - Расчета электрофизических параметров сформированных полупроводниковых структур;
 - Проектирования тестовых измерительных структур, используемых для контроля качества технологического процесса формирования объектов нанотехнологии;
 - Выбора технологического оборудования, необходимого для организации производства объектов нанотехнологии по разработанной маршрутной технологии.

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

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объемом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены основы технологических процессов, применяемых при формировании объектов нанотехнологии. Теоретическая часть учебного курса состоит из тринадцати лекций:

Лекция 1: Миниатюризация объектов нанотехнологии

Поколения элементной базы микро- и наносистем. Классификация интегральных схем как объектов нанотехнологии. Кремниевые подложки для интегральных схем. Технология получения полупроводникового кремния.

Лекция 2: Требования к основным технологическим процессам и применяемому оборудованию

Жидкостные химические процессы. Физико-термические процессы. Процесс ионной имплантации. Многоуровневая металлизация. Нанесение диэлектрических плёнок из жидкой фазы. Процессы ПХТ для технологии ИС с субмикронными проектными нормами.

Лекция 3: Формирование покрытий

Жидкостные химические процессы. Многоуровневая металлизация. Формирование проводящих слоев. Межуровневая изоляция и пассивация. Процесс ХМП диэлектрика. Эпитаксия. Формирование диэлектрических покрытий. Осаждение диэлектрических пленок.

Лекция 4: Травление покрытий

Плазмохимическое травление неорганических материалов. Плазмохимическое травление органических материалов. Плазмохимическая полимеризация и ее роль в плазмохимическом травлении материалов. Жидкостное химическое травление. Термодинамика травления. Общие принципы кинетики травления. Жидкостное травление. Практические аспекты жидкостного химического травления.

Лекция 5: Термические процессы

Окисление, осаждение, отжиг. Термическая диффузия примеси. 1-й и 2-й законы Фика. Особенности технологического процесса и оборудования. Операционные цикл. Твердые планарные источники (ТПИ).

Лекция 6: Ионная имплантация

Процесс ионной имплантации. Ионное легирование (имплантация - внедрение). Недостатки и ограничения ионной имплантации.

Лекция 7: Герметизация микро- и наносборок

Бескорпусная герметизация. Корпусная герметизация микро- и наносборок. Контроль герметичности.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в прохождении студентами лабораторного практикума. Все практические занятия по курсу проходят в специализированной лабораторной аудитории, оборудованной техническими средствами – микроскопами, с помощью которых студенты проводят исследование поверхностей объектов наноинженерии (интегральных микросхем).

Основные задания на лабораторный практикум:

- Анализ топологии полупроводниковой интегральной микросхемы;
- Анализ состава и размещения элементов базового матричного кристалла;
- Исследование точности совмещения комплекта фотошаблонов;
- Исследование тестовых структур.

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 18 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте nanolab.iu4.bmstu.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу «Техпроцессы наноинженерии»

Лекция 1: Миниатюризация объектов наноинженерии

1. К какому поколению элементной базы ЭВС относится наноэлектроника?

- | | |
|------------------------|---------------------|
| А) Первое поколение | Б) Второе поколение |
| В) Четвёртое поколение | Г) Пятое поколение |

Ответ:

2. Через какой период времени количество транзисторов в самой сложной ИС удваивается (согласно закону Мура)?

- А) 6 месяцев
В) 18 месяцев
- Б) 12 месяцев
Г) 24 месяца

Ответ:

3. Какое свойство подложек наиболее значимо?

- А) Тип электропроводности
В) Концентрация носителей заряда
- Б) Подвижность носителей
Г) Все вышеперечисленные

Ответ:

4. Наибольшее распространение в качестве полупроводникового материала получил:

- А) Германий
В) Арсенид галлия
- Б) Кремний
Г) Олово

Ответ:

5. Преимущества Si перед Ge, как полупроводникового материала:

- А) Более широкая запрещенная зона
В) Большие рабочие напряжения
- Б) Меньшие токи утечки
Г) Всё вышеперечисленное

Ответ:

Лекция 2: Требования к основным технологическим процессам и применяемому оборудованию

1. Какова предельная концентрация органических примесей на пластине при проектных нормах 0.5 мкм?

- А) 50 ат/см²
В) 100 ат/см²
- Б) 10 ат/см²
Г) 200 ат/см²

Ответ:

2. Какой из процессов не является термическим?

- А) Ионная имплантация
В) Осаждение
- Б) Эпитаксия
Г) Окисление

Ответ:

3. Почему при формировании подзатворного окисла применяется влажное окисление, а не сухое?

- А) С целью минимизации эффекта коробления
В) Для сохранения низкой плотности поверхностных состояний
- Б) Повышает устойчивость оксида к электрическому пробую
Г) Всё вышеперечисленное

Ответ:

4. PVD – это:

- А) Химическое осаждение из газовой фазы
В) Физическое осаждение из газовой фазы
- Б) Химико-механическая полировка
Г) Низкотемпературная эпитаксия

Ответ:

5. Для изотропного травления оксидов применяется:

- А) HCl
В) O₂
- Б) Cl₂
Г) NF₃

Ответ:

Лекция 3: Формирование покрытий

1. Эпитаксия – это:

- А) Процесс осаждения атомарного кремния на монокристаллическую кремниевую пластину
Б) Нагревание поверхности кремниевой пластины в присутствии O_2
В) Ионная имплантация ионов бора
Г) Плазмохимическое осаждение слоёв титана

Ответ:

2. Предельная толщина плёнки SiO_2 при термическом окислении зависит от:

- А) Свойств подложки
Б) Парциального давления O_2
В) Влажности среды
Г) Всего вышеперечисленного

Ответ:

3. Как влияет присутствие паров H_2O на рост плёнки окисла?

- А) Существенно замедляет
Б) Никак не влияет
В) Незначительно замедляет
Г) Ускоряет

Ответ:

4. Коэффициент сегрегации – это:

- А) Отношение растворимости примеси в Si к растворимости в SiO_2
Б) Отношение скорости диффузии, определяемой коэффициентами диффузии D в SiO_2 к скорости диффузии в Si
В) Отношение массы Si к массе SiO_2
Г) Отношение массы примеси к массе Si

Ответ:

5. В качестве дополнительного покрытия подзатворного окисла применяют:

- А) SiO_2
Б) BBr_3
В) Si_3N_4
Г) Si

Ответ:

Лекция 4: Травление покрытий

1. Эффект большой загрузки - это:

- А) Увеличение скорости травления при увеличении давления
Б) Снижение скорости травления с увеличением площади образцов
В) Увеличение скорости травления при росте концентрации атомов
Г) Переосаждение распыляемых ионами материалов электродов и стенок на поверхность образцов

Ответ:

2. Органические материалы травятся в плазме, содержащей:

- А) Кислород
Б) Фтор
В) Хлор
Г) Фосфор

Ответ:

3. Для какого типа травления характерно боковое подтравливание?

- А) Для изотропного
Б) Ни для какого
В) Для анизотропного
Г) Для обоих

Ответ:

В) Ломаную линию

Г) Экспоненту

Ответ:

4. Длина свободного пробега атома увеличивается при:

А) Увеличении массы иона

Б) Увеличении начальной энергии иона

В) В обоих случаях

Г) В обоих случаях не увеличивается

Ответ:

5. Доза аморфизации зависит от:

А) Атомного номера легирующего элемента

Б) Температуры мишени

В) От обоих параметров

Г) Не зависит от перечисленных параметров

Ответ:

Лекция 7: Герметизация микро- и наносборок

1. Пластмассы, переходящие под воздействием повышенной температуры в необратимое состояние называются

А) Полимеры

Б) Термопласты

В) Реактопласты

Г) Стеклотекстолиты

Ответ:

2. В качестве герметизирующих материалов используют:

А) Эпоксидные смолы

Б) Кремнийорганические смолы

В) Полиэфирные смолы

Г) Всё вышеперечисленное

Ответ:

3. Компаунд – это:

А) Тип клея

Б) Механические смеси из

электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей

В) Пластмассовый корпус

Г) Вывод микросхемы

Ответ:

4. Какое из металлических покрытий обладает наибольшей жёсткостью?

А) Палладирование

Б) Серебрение

В) Никелирование

Г) Золочение

Ответ:

5. К недостаткам шовной контактной (роликовой) сварки относится:

А) Низкая стойкость электродов

Б) Высокие механические напряжения в зоне контакта роликов с крышкой

В) Нестабильность размеров сварного шва

Г) Всё вышеперечисленное

Ответ:

Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 21 вопроса

1. Степень легирования некоторой локальной области монокристаллического кремния составляет $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Сколько атомов кремния приходится на один атом легирующей примеси?

2. С помощью какого из методов избирательного легирования можно получить максимальную концентрацию примеси на поверхности кристалла?

3. Что такое степень интеграции интегральной микросхемы?

4. В чем состоит разница между топологией и вертикальным профилем легирования микросхемы?
5. В чем состоят преимущества толсто пленочной технологии производства интегральных микросхем?
6. Какие легирующие элементы используются для формирования в кремнии областей n-типа проводимости?
7. Какие легирующие элементы используются для формирования в кремнии областей p-типа проводимости?
8. Какие существуют механизмы диффузии атомов легирующей примеси?
9. Что такое позитивный, а что такое негативный процессы литографии? В чем их различия?
10. Чем отличаются между собой эталонный и рабочий фотошаблоны, используемые при контактной литографии?
11. Почему алюминий, хотя и находится в 3 группе элементов таблицы Менделеева и является акцепторной примесью, не используется в качестве диффузанта?
12. Почему в процессе резки слитков кремния на пластины используется инструмент с внутренней режущей кромкой?
13. Каковы правила образования названий полупроводниковых материалов состава $A^III B^V$?
14. Какое условие необходимо соблюсти при проведении процесса ионной имплантации чтобы получить профиль легирования близкий к распределению Гаусса?
15. Что такое гетерогенная химическая реакция? В каком технологическом процессе нанотехнологии ее наличие является необходимым условием его нормального течения?
16. В чем состоит разница между одностадийным и двухстадийным процессами диффузии?
17. Что такое отжиг? В каком случае он применяется в технологическом процессе производства интегральных микросхем?
18. Перечислите, какие способы герметизации кристаллов интегральных микросхем Вам известны? Дайте краткую характеристику области применения каждого из них.
19. От какого из примесных элементов наиболее тяжело освободиться при зонной очистке слитка кремния и почему?
20. Какой характер имеет в кремнии зависимость предельной растворимости легирующей примеси от температуры?
21. Какой из методов эпитаксии обеспечивает наиболее совершенную структуру растущей пленки?

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 **«Технологические процессы в нанотехнологии»**

1. Методы контроля тонких пленок в процессе напыления
2. Технологический процесс получения кристаллов ИМС с "шариковыми" выводами
3. Фотолитография
4. Сборка интегральных микросхем
5. Монтаж кристаллов ИМС в корпус

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	
	«Технологические процессы в нанотехнологиях»	36 ч.	18 ч.		18 ч.	Контрольные вопросы Реферат
1.	Лекция 1: Миниатюризация объектов нанотехнологии		3 ч.	6 ч.		
2.	Лекция 2: Требования к основным технологическим процессам и применяемому оборудованию		2 ч.	5 ч.		
3.	Лекция 3: Формирование покрытий		3 ч.	6 ч.		
4.	Лекция 4: Травление покрытий		3 ч.	5 ч.		
5.	Лекция 5: Термические процессы		3 ч.	5 ч.		
6.	Лекция 6: Ионная имплантация		2 ч.	6 ч.		
7.	Лекция 7: Герметизация микро- и наносборок		2 ч.	5 ч.		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы		

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 – 8.

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры. Учебник для вузов., Под общ. ред. В.А.Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, - 2005. – 568 с.: ил.
2. Л.А.Коледов. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во «Лань», - 2008, 400 с.: ил.
3. О.Д.Парфенов. Технология микросхем. Учебное пособие для вузов. – М.: «Радио и связь», 1986. – 176 с.: ил.
4. К.Пирс, А.Адамс, Дж. Цай, Т.Сейдел, Д.Макгиллис. Технология СБИС. В 2-х кн., Кн.1. Пер. с англ. Под ред. С.Зи. – М.: Изд-во «Мир», 1986. – 404 с.: ил.
5. К.Могэб, Д.Фрейзер, У.Фитчнер, Л.Паррильо, Р.Маркус, К.Стейдел, У.Берстрем. Технология СБИС. В 2-х кн., Кн.2. Пер. с англ. Под ред. С.Зи. – М.: Изд-во «Мир», 1986. – 453 с.: ил.
6. Г.Я.Гуськов, Г.А.Блинов, А.А.Газаров. Монтаж микросхем. – М.: «Радио и связь», 1986.- 176 с., ил.
7. И.Е.Ефимов, И.Я.Козырь, Ю.И.Горбунов. Микроэлектроника. Учебное пособие для вузов. – М.: «Высшая школа», 1986. – 464 с.: ил.

8. Т.Сугано, Т.Икома, Е.Такэиси. Введение в микроэлектронику., Пер. с японского, под ред. В.Г.Ржанова. – Москва, Изд-во «Мир», 1988, - 320 с: ил.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части
учебного курса на сайте nanolab.iu4.bmstu.ru**