

Технологический институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ТТИ ЮФУ

_____ А. И. Сухинов

«__» _____ 2010 года

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников
высшей школы по направлению
«Нанoeлектроника и наномaгнетизм, компонентная база и устройства. Физические
принципы. Применяемые технологии при разработке и создании»
на базе учебного курса
«Лучевые и плазменные методы формирования наноструктур
интегральной электроники»

Цель: изучение основных лучевых и плазменных методов формирования наноструктур интегральной электроники, физических принципов функционирования и конструкций оборудования

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения: 24 часа

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с основными понятиями, принципами и особенностями методов лучевого и плазменного формирования наноструктур интегральной электроники с использованием современного нанотехнологического оборудования.

Программа обучения рассчитана на использование при организации краткосрочного повышения квалификации специалистов в области разработки субмикронной элементной базы и проектирования интегральных схем.

Требования к уровню освоения учебного курса.

Преподаватели и научные работники должны:

Знать:

- основы современных методов и технологий создания и исследования наноструктур интегральной электроники;
- основные аналитические методы исследования физико-химических свойств поверхности, морфологии и геометрии интегральных наноструктур.

- основы современных лучевых и плазменных методов обработки материалов и наноструктур;
- физические основы взаимодействия ускоренных частиц с твердым телом.
- принципы работы инновационного оборудования: модулей лучевой и плазменной обработки многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9, РЭМ Nova Nanolab 600;

Иметь навыки:

- использования современных экспериментальных методов анализа физических и химических свойств наноструктур и наноматериалов, исследования параметров и характеристик формируемых приборов и устройств;
- выбора необходимых для формирования наноструктур методов обработки;
- планирования экспериментальных исследований с учетом возможностей современного технологического оборудования;
- работы на исследовательском и измерительном оборудовании: СЗМ NanoEducator, оптических микроскопах МСП-2, МИИ-4М и др.

Иметь представление:

- об основных принципах построения, функционирования технологического и аналитического оборудования для лучевой и плазменной обработки наноструктур интегральной электроники (установок ионно-плазменного травления STE ICPe45 и осаждения STE ICPd47, электронно-лучевой обработки);
- о мировых тенденциях развития лучевых и плазменных методов формирования структур наноэлектроники;
- о технологических процессах формирования перспективной элементной базы микро- и наноэлектронной аппаратуры.

Краткая аннотация учебного курса

«Лучевые и плазменные методы формирования наноструктур интегральной электроники»

Дистанционная часть курса посвящена изучению:

- основных характеристик процессов лучевого формирования микро- и наноструктур: электронно- и ионно-лучевого;
- основных характеристик плазменных процессов формирования микро- и наноструктур.

Очная часть курса посвящена приобретению навыков:

- использования современных экспериментальных методов анализа физических и химических свойств наноструктур и наноматериалов, исследования параметров и характеристик формируемых приборов и устройств;
- изучение принципов работы установок лучевой и плазменной обработки в процессах формирования наноструктур (установок ионно-плазменного травления STE ICPe45 и осаждения STE ICPd47, электронно-лучевой обработки);
- изучение принципов работы инновационного оборудования: модулей лучевой и плазменной обработки многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9, РЭМ Nova Nanolab 600.

Реферативное описание содержания лекций дистанционной части курса

Лекция №1 Плазменные процессы формирования наноструктур

Технологические процессы с использованием плазмы при изготовлении изделий микро- и наноэлектроники. Схема процесса ионно-плазменного распыления. Высокочастотное плазменное распыление: травление на основе индуктивно-связной плазмы (ИСП) и электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Получение углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Факторы, определяющие свойства углеродных нанотрубок, полученные методом плазмохимического осаждения из газовой фазы.

Лекция №2 Электронно-лучевые процессы формирования наноструктур

Электронные пучки в технологических процессах. Преобразование энергии в зоне действия пучка: основные явления, рентгеновское излучение и его экранирование, эмиссия тепловых и вторичных электронов, отражение электронов, глубина проникновения электронов в твердое тело, теплопроводность и излучение, мощность и удельная поверхностная мощность. Направления электронно-лучевой обработки: термическая размерная обработка компактных тел, термическая размерная обработка тонких слоев, нетермическая обработка. Электронно-лучевая литография: основные понятия, типы электронных резистов, виды электронно-лучевой литографии. Пример оборудования: электронный микроскоп с системой электронной литографии Nova Nanolab 600. Подготовка образцов на примере очистки поверхности подложек Si или SiC.

Лекция №3 Ионно-лучевые процессы формирования наноструктур

Ионная имплантация. Ионно-лучевая литография. Общая характеристика метода фокусированных ионных пучков (ФИП). Основные возможности метода ФИП. Принципы работы оборудования ФИП. Ионно-стимулированное травление и осаждение материалов.

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится 24 часа, в том числе лекционные занятия и самостоятельная работа – 12 часов, лабораторные занятия – 12 часов. Тексты лекций в полном объеме представлены на сайте www.nanoobr.ru. Для облегчения самостоятельного контроля уровня подготовки слушателей разработаны **тестовые вопросы**. Преподаватель оценивает уровень подготовки слушателей посредством **контрольных вопросов**.

Тестовые вопросы по курсу

«Лучевые и плазменные методы формирования наноструктур интегральной электроники»:

Тестовые вопросы к лекции №1:

1. Какой тип газовой плазмы используется в качестве источника частиц в методах ИПТ?
 - a) низкотемпературная,
 - b) высокотемпературная.

2. Что входит в состав ионизированного газа такой плазмы?
- электроны, заряженные ионы,
 - стабильные и возбужденные атомы и молекулы (радикалы),
 - электроны, заряженные ионы, стабильные и возбужденные атомы и молекулы (радикалы)
 - все перечисленное за исключением стабильным атомов или молекул.
3. Какова роль магнитного поля в процессе образования плазмы?
- увеличение кинетической энергии частиц плазмы,
 - удержание плазмы,
 - удержание плазмы, повышение степени ионизации газа,
 - все перечисленное за исключением удержания плазмы.
4. На какие две группы делятся ионно-плазменные методы по природе взаимодействия энергетических частиц плазмы с материалом?
- ионное и плазменное,
 - физическое и химическое,
 - активное и реактивное,
 - напыление и травление.
5. Какие по проводимости материалы мишени используются при ИПТ с подачей постоянного потенциала?
- проводящие,
 - непроводящие,
 - проводящие и непроводящие.
6. Для каких целей применяется метод плазмохимического осаждения из газовой фазы?
- получения гидрофобных покрытий;
 - получения углеродных нанотрубок;
 - формирования металлизации;
 - очистки поверхности перед проведением технологических операций.
7. Какие металлы используются в качестве катализаторов при росте УНТ методом плазмохимического осаждения из газовой фазы?
- Fe, Co, Ni, Mo;
 - Al, Li, Cu, Mg;
 - Ga, Au, Ag, Pt;
 - Sn, Na, K, Ca.
8. Какова основная роль плазмы при выращивании УНТ методом плазмохимического осаждения из газовой фазы?
- регулировка электропроводности УНТ;
 - разогрев мишени для достижения температуры роста;
 - формирование каталитических центров;
 - ориентирование УНТ в пространстве.
9. Какой из параметров оказывает определяющее влияние на геометрические параметры выращиваемых УНТ?
- температура проведения процесса;
 - величина внешнего магнитного поля;
 - материал и геометрические размеры каталитических центров;
 - состав газовой фазы и газовых примесей.

Тестовые вопросы к лекции №2:

1. Чем определяется кинетическая энергия электронов в пучке?
 - a) расстоянием до мишени,
 - b) ускоряющим напряжением,
 - c) плотностью электронного тока,
 - d) всем перечисленным.

2. При каких наименьших значениях ускоряющего напряжения электронов необходим учет релятивистских эффектов?
 - a) 50 кВ, b) 75 кВ, c) 100 кВ, d) 125 кВ, e) 150 кВ.

3. Какая группа процессов лежит в основе всех способов электронно-лучевой технологии?
 - a) возникающее в зоне действия тепло и возбуждение атомов или молекул,
 - b) отражение и рассеяние электронов,
 - c) возникающее в зоне действия тепло и его распространение за счет теплопроводности,
 - d) вторичные процессы, теплоотвод теплопроводностью и излучением.

4. Чем определяется доля энергии пучка переходящая в реактивное излучение?
 - a) ускоряющим напряжением,
 - b) атомным номером мишени,
 - c) ускоряющим напряжением и атомным номером мишени,
 - d) ускоряющим напряжением, атомным номером и толщиной мишени.

5. В каком из случаев необходимо увеличивать толщину экрана рентгеновского излучения?
 - a) если атомный номер мишени меньше исходного,
 - b) если атомный номер мишени больше исходного.

6. Какими параметрами в первую очередь определяется ток вторичной электронной эмиссии?
 - a) материалом мишени и температурой мишени,
 - b) углом падения пучка и температурой мишени,
 - c) материалом мишени и углом падения,
 - d) всем перечисленным.

7. Как изменяются доля отраженных электронов и максимум отражения с ростом атомного номера материала мишени?
 - a) доля возрастает, а максимум отражения смещается в область более высоких энергий,
 - b) доля возрастает, а максимум отражения смещается в область более низких энергий,
 - c) доля уменьшается, а максимум отражения смещается в область более высоких энергий,
 - d) доля уменьшается, а максимум отражения смещается в область более низких энергий.

8. Какие из процессов ответственны за наибольшие потери энергии электронов?
 - a) рентгеновское излучение,
 - b) отражение электронов,
 - c) вторичная электронная эмиссия,
 - d) рентгеновское излучение вместе с вторичной электронной эмиссией.

9. Чем определяется глубина проникновения электронов в твердое тело?
 - a) энергией электронов и плотностью твердого тела,
 - b) мощностью электронного пучка и плотностью твердого тела,
 - c) энергией и длительностью воздействия, а также теплофизическими свойствами материала мишени.

10. На каком расстоянии от поверхности поглощаемая мощность достигает максимума?

a) $S/2$, b) $S/3$, c) $S/4$, d) $2S/5$, где S – глубина проникновения электронов.

11. Каким образом можно повысить объемную плотность поглощаемой мощности?

- a) увеличением плотности тока,
- b) увеличением ускоряющего напряжения,
- c) увеличением плотности тока и ускоряющего напряжения,
- d) увеличением ускоряющего напряжения и уменьшением плотности тока.

12. В каком из случаев толщина/глубина обработки должна быть больше глубины проникновения электронов в материал?

- a) при термической размерной обработке компактных тел,
- b) при термической размерной обработке тонких слоев,
- c) при нетермической обработке.

13. Какие основные процессы позволяет осуществить электронно-лучевая технология?

- a) изменение агрегатного состояния, сварку и очистку,
- b) химические электронно-лучевые способы,
- c) термическую и нетермическую обработку,
- d) все вышеперечисленное.

14. Применение какого типа электронорезиста обуславливает последующее удаление экспонированной области резиста электронным лучом?

- a) позитивного,
- b) негативного,
- c) позитивного и негативного,
- d) при растворении удаляется необлученная область.

15. Какой из видов электронно-лучевой литографии обладает большей производительностью?

- a) растровая,
- b) векторная,
- c) векторная с изменяемой формой луча.

Тестовые вопросы к лекции №3:

1. Для каких целей применяется метод ионной имплантации?

- a) профилирования поверхности полупроводниковых материалов;
- b) легирования полупроводниковых материалов;
- c) отжига полупроводниковых материалов;
- d) подготовки и очистки поверхности.

2. Каково основное преимущество ионно-лучевой литографии перед другими литографическими методами?

- a) более высокая скорость проведения процесса;
- b) простота метода;
- c) отсутствие дифракционных ограничений;
- d) отсутствие необходимости формирования шаблонов.

3. Какие основные операции позволяет осуществить технология ФИП?

- a) ионно-лучевое травление и осаждение материалов;
- b) ионную очистку поверхности;
- c) ионную имплантацию широкой номенклатуры материалов;
- d) локальный отжиг поверхности.

4. Какой тип ионного источника наиболее широко применяется в современных системах ФИП?
- а) дуоплазменный;
 - б) жидкометаллический;
 - в) газофазный;
 - г) газофазный с ВЧ генерацией плазмы.
5. Какой эффект возникает при обработке диэлектрических материалов фокусированным ионным пучком?
- а) разогрев поверхности;
 - б) образование кратеров за счет локального испарения материала;
 - в) осаждение на поверхности диэлектрика пленки галлия;
 - г) накопление электрического заряда на поверхности.

**Контрольные вопросы по курсу
«Лучевые и плазменные методы формирования наноструктур
интегральной электроники»:**

Контрольные вопросы к лекции №1:

1. В чем заключается преимущество методов ионно-плазменного травления перед жидкостным травлением в технологических процессах формирования микро- и наноструктур?
2. По каким признакам разделяют процессы ионно-плазменного распыления?
3. Какие виды ионно-плазменного травления вы знаете?
4. Каков механизм плазмохимического травления?
5. Какие газовые смеси используют при ПХТ?
6. Опишите схему процесса ионно-плазменного распыления.
7. В чем отличие ИСП и ЭЦР способов высокочастотного распыления?
8. Опишите технологию выращивания углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы?
9. Назовите основные составные части реактора установки химического осаждения из газовой фазы в индуцированной плазме?
10. Назовите основные факторы, определяющие свойства углеродных нанотрубок, полученных методом плазменного ГФХО?
11. Опишите стандартный технологический процесс выращивания УНТ?

Контрольные вопросы к лекции №2:

1. В чем заключается необходимость создания вакуума при использовании электронного луча в качестве технологического инструмента?
2. Какие основные процессы протекают при взаимодействии ускоренных электронов с веществом? Перечислите и кратко охарактеризуйте их.
3. Каковы основные направления электронно-лучевой обработки? Кратко охарактеризуйте их. Выделите особенности.
6. Чем обусловлена большая разрешающая способность и меньшая производительность электронно-лучевой литографии в сравнении с фотолитографией?
7. Объясните эффект уширения области экспонирования. Как его минимизировать?
8. Каковы основные виды, достоинства и недостатки электронно-лучевой литографии?
9. Каковы предельные возможности, ограничения электронно-лучевой технологии в области формирования микро- и наноструктур?
10. Чем обусловлена возможность проведения наиболее важных процессов электронно-лучевой технологии и почему они имеют собственные диапазоны режимов обработки?

Контрольные вопросы к лекции №3:

1. В чем заключается процесс ионной имплантации?
2. Назовите основные преимущества и недостатки ионно-лучевой литографии?
3. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные процессы, которые позволяет производить метод фокусированных ионных пучков?
4. Назовите основные составные части системы ФИП?
5. Поясните принцип работы системы ФИП в режиме ионной микроскопии?

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	
	Лучевые и плазменные методы формирования наноструктур интегральной электроники	24 ч.	6 ч.	6 ч.	12 ч.	1. Тестовые вопросы (самоконтроль) 2. Контрольные вопросы (электронная зачётка) 3. Отчеты по лабораторным работам
1.	Лекция №1 Плазменные процессы формирования наноструктур		2 ч.	2 ч.	4	
2.	Лекция №2 Электронно-лучевые процессы формирования наноструктур		2 ч.	2 ч.	4	
3.	Лекция №3 Ионно-лучевые процессы формирования наноструктур		2 ч.	2 ч.	4	
	Итоговый контроль		Тесты	Контрольные вопросы (электронная зачетка)	Отчеты по лабораторным работам	

Основная литература:

1. Плазменная технология в производстве СБИС: пер. с англ. с сокращ. / под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. М.: Мир, 1987. 470 с.
2. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Т. 1 / под ред. А.П. Достанко. Минск: ФУАинформ, 2000. 424 с.
3. Chowalla M. et. al. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. № 10. P. 5308 – 5317.
4. Melechko A.V., Merkulov V.I., McKnight T.E., M.A. Guillorn, K.L. Klein, D.H. Lowndes, Simpson M.L. Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 041301-1 – 041301-39.

5. Шиллер З., Гайзик У., Панцер З. Электронно-лучевая технология / пер. с нем. В.П. Цишевского, вступ. ст. Б.Е. Патона. М.: Энергия, 1980. 528 с.
6. Зи С. Технология СБИС: в 2-х книгах. // Москва: Мир. 1986, 404 с.
7. Валиев К.А. Физика субмикронной литографии. М.: Наука, 1990.
8. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии: учеб. пособ. / под общ. ред. Л.Н. Патрикеева. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. 431 с.
9. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник // Москва: Радио и связь, 1991. – 528 стр.
10. Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии // Москва: Высшая школа, 1984. – 320 с.
11. Iwao Ohdomari, Single-ion irradiation: physics, technology and applications // Journal of physics D: applied physics, 41, 2008, 27pp.
12. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Ширяев С.Ю. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии // Минск: Университетское, 1990. – 320 с.
13. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. // Москва: Физматлит, 2006.–552 с.
14. Агеев О.А., Гусев Е.Ю., Смирнов В.А., Федотов А.А. Изучение поверхности твердых тел методом атомно-силовой микроскопии на СЗМ NanoEducator: Ч. I. ТТИ ЮФУ, Таганрог, 2007. 38с. / Ч. II. ТТИ ЮФУ, Таганрог, 2007. –38с.
15. Агеев О.А., Коломийцев А.С., Смирнов В.А., Федотов А.А. Руководство к выполнению лабораторных работ с использованием многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ. Ч. I. ТТИ ЮФУ, Таганрог, 2009. –40с. / Ч. II. ТТИ ЮФУ, Таганрог, 2009. –40с.

Дополнительная литература:

1. Deck C.P., Vecchio K. Growth mechanism of vapor phase CVD // Carbon. 2005. Vol. 43. № 12. P. 2608-2617.
2. M S Bell, KBK. Teo, W I Milne. Factors determining properties of multi-walled carbon nanotubes/fibres deposited by PECVD// J. Phys. D: Appl. Phys.2007.vol.40,p.2285–2292
3. Грибов В.А., Григорьев Ф.И. и др. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Издат. дом «Круглый год», 2001.
4. Warren J. MoberlyChan, David P. Adams, Michael J. Aziz, Gerhard Hobler, Thomas Schenkel. Fundamentals of focused ion beam. Nanostructural processing: below, at, and above the surface // Mrs bulletin, volume 32, may 2007, p 424–432.
5. C.A.Volkert, A.M. Minor. Focused ion beam, microscopy and micromachining // Mrs bulletin, volume 32, may 2007, p 389–399.
6. Takeo Kamino, Tsuyoshi Onishi, Kaoru Umemura, Kyoichiro Asayama, Kazutoshi Kaji. New semiconductor device evaluation system for failure analysis of sub-nanometer areas // Hitachi Review, No. 3, volume 52, 2003, p 133–139.
7. Достанко А.П., Толочко Н.К., Бордусов С.В., Агеев О.А. и др. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии // Минск: Бестпринт, 2005. –682 с.
8. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Пилипенко В.А. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС // Харьков: НТК “Институт монокристаллов”, 2008. - 392 с.

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

Курс разработан: проф. Агеев О.А., Гусев Е.Ю., Коломийцев А.С., каф. ТМ и НА, ТТИ ЮФУ