

«СОГЛАСОВАНО»

Ректор СПбГЭТУ

\_\_\_\_\_ / Кутузов В. М. /

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников**  
**высшей школы по направлению**  
**“ Нанотехнологии для систем безопасности ”**  
**на базе учебного курса**  
**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**  
(наименование учебного курса)

Цель: ознакомление с принципами работы, устройством оборудования и технологическими особенностями фокусированного ионного пучка, используемыми режимами работы и различными направлениями применения технологии.

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 24 часа

Форма обучения с частичным отрывом от работы, дистанционно- очная

Режим занятий 8 часов в день

*Целью и задачами данного курса является* ознакомление с особенностями устройства оборудования фокусированного ионного пучка, режимами работы, методиками проведения прецизионного травления и наблюдения изображения при различных видах контраста. Предметом рассмотрения также являются физико-технологические процессы, протекающие в вакуумной камере установки при прецизионном ионно-лучевом травлении в процессе обработки или исследования образцов, а также при проведении ионно-стимулированных реакций травления и осаждения различных материалов.

Требования к уровню освоения учебного курса.

Преподаватели должны:

- Знать:
  - основные принципы работы технологии фокусированного ионного пучка;
  - устройство оборудования, назначение и принцип работы его основных составных частей, таких как, жидкометаллический источник ионов, детектор вторичных частиц, газовые инжекционные системы и др.;
  - особенности протекания ионно-стимулированных химических реакций;
  - направления применения технологии ФИП и конкретные способы реализации проводимых операций: препарирование, изучение внутреннего строения, формирование структур, модификация приборов;
  - основные преимущества технологии ФИП при её применении в исследованиях и на производстве, а также имеющиеся ограничения, которые могут воспрепятствовать её использованию;
- Иметь навыки:
  - постановки практических задач, которые могут быть решены с использованием технологии ФИП в научно-исследовательских целях или при формировании каких-либо объектов микротехнологии, а также проведения оценки целесообразности её использования;

- интерпретации изображений, получаемых с помощью ФИП, на основе представлений о геометрии формируемого поперечного среза и принципов получения контраста изображения;
- расчёта основных параметров процесса, таких как, доза ионов на единицу площади поверхности, коэффициент распыления, скорость удаления материала;
- Иметь представление:
  - о дополнительных возможностях ФИП технологии, связанных с ионной литографией, ионной имплантацией, подготовкой образцов для просвечивающей электронной микроскопии и т.п.;
  - о перспективах развития технологии фокусированного ионного пучка и основанных на ней комплексных методов.

Научные работники должны:

- Знать:
  - основные принципы работы технологии фокусированного ионного пучка;
  - устройство оборудования, назначение и принцип работы его основных составных частей, таких как, жидкометаллический источник ионов, детектор вторичных частиц, газовые инжекционные системы и др.;
  - особенности протекания ионно-стимулированных химических реакций;
  - направления применения технологии ФИП и конкретные способы реализации проводимых операций: препарирование, изучение внутреннего строения, формирование структур, модификация приборов;
  - основные преимущества технологии ФИП при её применении в исследованиях и на производстве, а также имеющиеся ограничения, которые могут воспрепятствовать её использованию;
- Иметь навыки:
  - постановки практических задач, которые могут быть решены с использованием технологии ФИП в научно-исследовательских целях или при формировании каких-либо объектов микротехнологии, а также проведения оценки целесообразности её использования;
  - интерпретации изображений, получаемых с помощью ФИП, на основе представлений о геометрии формируемого поперечного среза и принципов получения контраста изображения;
  - расчёта основных параметров процесса, таких как, доза ионов на единицу площади поверхности, коэффициент распыления, скорость удаления материала;
- Иметь представление:
  - о дополнительных возможностях ФИП технологии, связанных с ионной литографией, ионной имплантацией, подготовкой образцов для просвечивающей электронной микроскопии и т.п.;
  - о перспективах развития технологии фокусированного ионного пучка и основанных на ней комплексных методов.

Учебный курс «Основы технологии фокусированных ионных пучков» 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 лабораторий в Санкт-Петербургском электротехническом университете.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены особенности устройства оборудования фокусированного ионного пучка, режимы работы и методики проведения прецизионного травления и наблюдения изображения при различных видах контраста. Предметом рассмотрения являются физико-технологические процессы, протекающие в вакуумной камере установки при прецизионном ионно-лучевом травлении в процессе обработки или исследования образцов, а также при проведении ионно-стимулированных реакций травления и осаждения различных материалов.

Теоретическая часть учебного курса состоит из трех лекций:

### **Лекция 1. Аппаратно-методическое обеспечение технологии фокусированных ионных пучков**

Фокусированный ионный пучок (ФИП). Основные возможности и направления применения. Основные режимы работы ФИП: ионное распыление, ионно-стимулированное травление и осаждение. Виды контраста при получении изображения. Оборудование ФИП и его составные части. Схема установки. Вакуумная система, размещение образцов в камере. Параметры фокусированного ионного пучка. Жидкометаллический источник ионов. Схема электродов источника. Детекторы для регистрации изображения. Электронный умножитель. Особенности наноразмерного ионно-лучевого травления. Минимальные размеры и погрешность формируемых структур. Зависимость параметров от диаметра и тока ионного пучка. Получаемое аспектное отношение. Влияние ускоряющего напряжения и угла падения электронов. Модификация поверхности: аморфизация и легирование галлием. Современные аналитико-технологические комплексы на основе ФИП. Дополнительное подключаемое оборудование.

### **Лекция 2. Ионно-стимулированные химические процессы**

Ионно-стимулированные химические процессы травления и осаждения. Схема оборудования. Ионно-стимулированное селективное травление. Выбор реагентов для различных материалов. Зависимость эффективности ионно-стимулированного травления от плотности тока и от ускоряющего напряжения. Применение селективного травления. Ионно-стимулированное локальное осаждение платины и его физико-технологические особенности. Зависимости эффективности осаждения для различных режимов. Точность осаждения структур. Состав осаждаемых слоёв и их проводимость. Ионно-стимулированное локальное осаждение диэлектрика. Модельное представление процесса и его физико-технологические особенности. Влияние параметров сканирования. Сопротивление осаждаемых слоёв.

### **Лекция 3. Применение технологии ФИП: формирование структур, диагностика и модификация ИМС и приборов МЭМС**

Различные направления использования технологии ФИП. Создание поперечных срезов на поверхности образцов, последовательность операций. Исследование материалов и многослойных структур. Наблюдение квантовой ямы в структуре АЗВ5. Операции препарирования интегральных микросхем. Максимальное увеличение. Различные методики наблюдения структуры ИМС. Модификация и ремонт ИМС. Формирование структур и элементов МЭМС. Обработка карбида кремния. Создание приборов интегральной оптики и эмиссионной электроники. Реконструкция и ремонт приборов МЭМС.

### **Методические рекомендации по реализации учебной программы**

На дистанционную и очную части учебного курса отводится 12 и 12 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru). Для контроля степени освоения

теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

## **Тестовые вопросы и задания к курсу «Основы технологии фокусированных ионных пучков»**

### **Лекция 1. Аппаратно-методическое обеспечение технологии фокусированных ионных пучков**

#### **1. Почему в жидкометаллических источниках ионов в качестве рабочего вещества получил распространение галлий?**

- 1) Достаточно химически стойкий на воздухе и в воде.
- 2) Низкая температура плавления и низкое давление паров.
- 3) Металлический галлий не токсичен для организма.
- 4) Является акцептором при легировании кремния.

#### **2. Какая фокусирующая и отклоняющая система применяется для управления наноразмерным ионным пучком?**

- 1) Напряжение, подаваемое на электростатические электроды.
- 2) Система катушек, формирующих магнитное поле.
- 3) Скрещенное электрическое и магнитное поле, разделяющее ионы.

#### **3. Какие конструкции используются при построении вакуумной системы ФИП?**

- 1) Криогенные ловушки для сверхвысокого вакуума.
- 2) Разделение вакуумного объема: отдельно источник, отдельно образец.
- 3) Механические заслонки для прерывания потока ионов.

#### **4. Наиболее распространённый принцип действия жидкометаллического источника ионов?**

- 1) Распыление через форсунку.
- 2) Острая игла, смоченная по поверхности металлом.
- 3) С плоской поверхности чистого металла вытягиваются вис커еры.

#### **5. Какой из методов не может быть реализован на основе ФИП?**

- 1) Вторичная ионная масс-спектрометрия.
- 2) Рентгеновский флуоресцентный микроанализ.
- 3) Растровая ионная микроскопия.
- 4) Глубокая имплантация с большими дозами.

#### **6. Какая особенность энергетического диапазона ионов 30-50 кэВ применяемая в технологии ФИП?**

- 1) Очень небольшое количество вносимых в мишень дефектов.
- 2) Большая эффективность распыления материала мишени.
- 3) Эффективная имплантация ионов на большую глубину.

#### **7. Какие вторичные частицы не образуются при взаимодействии ионов с подложкой в технологии ФИП (~30 кВ)?**

- 1) Электроны.
- 2) Нейтральные атомы.
- 3) Гамма-излучение.
- 4) Кластерные многоатомные частицы.

#### **8. Какой контраст используется для определения напряжения в цепях микроприборов?**

- 1) Морфолого-топологический.
- 2) Вещественный.
- 3) Потенциальный.
- 4) Кристалло-ориентационный.

#### **9. Какие общие особенности имеют растровая электронная и ионная микроскопия?**

- 1) Области рассеяния первичных частиц имеют одинаковы размеры.
- 2) Отклик от образца может наблюдаться во вторичных электронах.
- 3) Эффективное рентгеновское излучение позволяющее проводить микроанализ.

## **Лекция 2. Ионно-стимулированные химические процессы**

**10. Какой физический эффект не присутствует в ионно-стимулированном химическом процессе осаждения или травления?**

- 1) Передача энергии от первичных ионов атомам химического реагента.
- 2) Каскадная ионизация атомов химического реагента.
- 3) Имплантация атомов химического реагента на большую глубину.
- 4) Образование летучих (или наоборот, нелетучих) химических соединений.

**11. Какие материалы наиболее эффективно травятся с участием фторида ксенона?**

- 1) Металлы и сплавы.
- 2) Карбид кремния, кремний и другие кремний содержащие материалы.
- 3) благородные металлы (золото, серебро и др.).

**12. Какой процесс помогает проводить ионно-стимулированное химическое травление с участием йода?**

- 1) Образование летучих химических соединений.
- 2) Нейтрализация вылетевших с поверхности ионов.
- 3) Передача энергии активации посредством фотонов.

**13. При каких условиях происходит быстрое и эффективное ионно-стимулированное осаждение материала (платина, оксид кремния или др.)?**

- 1) Поток ионов большой плотности и больших токов пучка.
- 2) Минимально возможные ионные токи, минимизирующие травление.
- 3) Ионный ток, полностью разлагающий газ вводимого в камеру реагента.

## **Лекция 3. Применение технологии ФИП**

**14. Какие преимущества имеет технология фокусированного ионного пучка перед стандартным технологическим циклом литография – плазменное травление.**

- 1) Групповая обработка всех кристаллов на пластине.
- 2) Возможность бесшаблонного создания экспериментальных образцов.
- 3) Использование в массовом промышленном производстве.

**15. Какие из особенностей присущи технологии наноразмерных фокусированных ионных пучков?**

- 1) Независимость от электромагнитных помех.
- 2) Возможность одновременной обработки всей пластины.
- 3) Возможность наблюдения за прохождением технологического процессом.

**16. Какой масштаб увеличения не соответствует растровому ионному микроскопу?**

- 1) Наблюдение составных частей интегральных элементов ИМС.
- 2) Диапазон масштабов обычного растрового электронного микроскопа.
- 3) Диапазон масштабов позволяющий различить моноатомные включения.

**17. Какое из условий является наиболее важным в технологии ФИП при технологической обработке микроприборов и получении изображения во вторичных электронах?**

- 1) Отсутствие углеводородных соединений в составе обрабатываемого материала.
- 2) Хороший сток заряда возникающего на поверхности образца.
- 3) Подложка должна быть монокристаллическая с точной ориентацией поверхности.

**18. При обработке каких приборов фокусированным ионным пучком, наиболее вероятно нарушение их рабочих качеств?**

- 1) Полупроводниковые приборы.
- 2) Микроразмерные дифракционные оптические элементы.

- 3) Микромеханические устройства.
- 4) Подложки гибридных интегральных схем.

### **Контрольные вопросы для проверки материала**

#### **Контрольные вопросы к лекции 1:**

1. Фокусированный ионный пучок (ФИП), основные возможности и направления применения.
2. Основные режимы работы ФИП.
3. Виды контраста при получении изображения.
4. Оборудование ФИП, составные части и схема установки.
5. Жидкометаллический источник ионов
6. Детекторы для регистрации изображения
7. Особенности наноразмерного ионно-лучевого травления. Получаемые параметры структур. Их зависимость от параметров ионного пучка.
8. Современные аналитико-технологические комплексы на основе ФИП.

#### **Контрольные вопросы к лекции 2:**

9. Ионно-стимулированные химические процессы травления и осаждения. Схема оборудования.
10. Ионно-стимулированное селективное травление.
11. Ионно-стимулированное локальное осаждение платины. Физико-технологические особенности.
12. Ионно-стимулированное локальное осаждение диэлектрика. Модельное представление процесса и физико-технологические особенности процесса.

#### **Контрольные вопросы к лекции 3:**

13. Исследование материалов и многослойных структур.
14. Операции препарирования интегральных микросхем.
15. Модификация и ремонт ИМС
16. Формирование структур и элементов МЭМС. Создание приборов интегральной оптики и эмиссионной электроники
17. Реконструкция и ремонт приборов МЭМС

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 «Основы технологии фокусированных ионных пучков»**

1. Технология фокусированного ионного пучка: основные принципы работы и направления применения.
2. Двухлучевые системы – ФИП и РЭМ. (DualBeam<sup>®</sup>, CrossBeam<sup>®</sup>)
3. Жидкометаллические источники ионов.
4. Применение жидкометаллических источников ионов различных химических элементов (кроме галлия).
5. Принципы построения фокусирующих ионных систем.
6. Детекторы регистрации вторичных электронов для микроскопии.
7. Принципы получения различных видов контраста в растровом электронном (ионном) микроскопе.
8. Дополнительные аналитические методики для растровой электронной и ионной микроскопии (SIMS, EDX, WLD, STEM, BSE).

9. Гелиевый ионный микроскоп.
10. Системы ФИП различных производителей (FEI, Zeiss, Jeol, Tescan). Их особенности и специализация применения.
11. Возможности технологии ионно-стимулированного локального осаждения (FIB-CVD).
12. Применение различных химических реагентов для процессов ФИП (FIB) травления ( $\text{XeF}_2$ ,  $\text{I}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl}$ ) и осаждения ( $\text{C}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Cu}$ ).
13. Возможности технологии ФИП по созданию поперечных срезов, исследованию внутреннего строения материалов, структур.
14. Применение технологии ФИП для работы с интегральными схемами: препарирование, модификация и ремонт.
15. Применение технологии ФИП для формирования МЭМС-систем и других специализированных структур (например, ВТСП, зонды АСМ, микрооптика).
16. Сравнение характеристик технологии ФИП и ионной имплантации. Общие особенности и различия.
17. Приготовление образцов для просвечивающей микроскопии. Стандартные способы и применение ФИП.
18. Применение электрических зондов и микроманипуляторов в электронной (ионной) микроскопии.
19. Программы моделирования взаимодействия ионов с твёрдым телом TRIM /SRIM.

### 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	
	«Основы технологии фокусированных ионных пучков»	24 ч.	10ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)
1.	Лекция 1. Аппаратно-методическое обеспечение технологии фокусированных ионных пучков		4 ч.	1,0 ч.		Реферат
2.	Лекция 2. Ионно-стимулированные химические процессы		3 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3. Применение технологии ФИП: формирование структур, диагностика и модификация ИМС и приборов МЭМС		3 ч.	0,5 ч.		
Итоговый контроль			1. Тесты для самотестирования	2. Контрольные вопросы (электронная зачётка), решение задач	3. Реферат, задачи	Реферат, задачи

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

**Основная литература:**

1. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера. 2004.
2. Кузнецова М.А., Лучинин В.В., Савенко А.Ю., Трушлякова В.В. и др. Микроскопия интегральных схем / Под ред. В.В. Лучинина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. 172 с.
3. Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Ионно-лучевая технология сверхлокального препарирования интегральных схем. // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Серия "Физика твёрдого тела и электроника". 2006. № 2. С. 28–35.
4. Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Технология локального прецизионного травления фокусированным ионным пучком // Вакуумная техника и технология. 2008. Т.18. № 3. С. 191–195. (<http://www.vacuum.ru/cgi-bin/zurnal/arhiv.cgi>)
5. Кузнецова М.А., Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании изделий микро- и наносистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 8. С. 24-32. (<http://www.microsystems.ru/full.shtml>)

**Дополнительная литература:**

1. Orloff J., Utlaut M., Swanson L. High Resolution Focused Ion Beams. Kluwer Academic. 2003.
2. Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Наноразмерные ионно-лучевые технологии// Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы. Монография. / Под ред. В. В. Лучинина и Ю. М. Таирова. – М.: Физматлит. 2006. С. 284–304.
3. Moore D. F., Daniel J. H., Walker J. F. Nano- and micro-technology applications of focused ion beam processing // Microelectronics Journal. V. 28. N. 4. 1997, P. 465–473.
4. Зигмунд П. Механизмы и теория физического распыления // Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твёрдых тел: Сб. статей 1986-1987 гг.: Пер. с англ./Сост. Е.С. Машкова М.: Мир, 1989.
5. Броддай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М., Мир, 1985.
6. Еремин А. П., Смолянинов В. Д., Филачев А. М. Ионные источники для технологического ионно-плазменного оборудования // Прикладная физика. 1997. № 2–3. С. 18–24.
7. Tao, T., Ro, J.S., Melngailis, J. Focused ion beam induced deposition of platinum // J. Vac. Sci. Technol. B, 8(6), 1990. P. 1826–1829.
8. A. Fernández-Pacheco, R. Córdoba, J.M de Teresa, O. Montero, M. R. Ibarra. Ion Beam Induced Deposits of Pt: Composition, Vol/dose and electrical transport properties. Proc. of EFUG 2007.
9. В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. Материалы и элементы электронной техники. Том 1. М.: Академия. 2006.
10. Petzold J., Heard M. «Digital scan model for ion beam gas-assisted deposition». Journal of Vacuum Science and Technology, vol. 9, pp. 2664-2671, 1991.
11. Lipp S. Frey L. TEOS as a precursor for focused ion beam and e-beam assisted insulator (SiOx) deposition // Journal of Vacuum Science and Technology, vol. 14(6), pp. 3651-3664, 1996.
12. Лучинин В.В., Савенко А.Ю., Тагаченков А.М. Методы микро- и



наноразмерной обработки материалов и композиций // Петербургский Журнал Электроники. № 2. 2005. С. 3–14.

13. Strata FIB 205 xP Manual Set. FEI Company. 2000.

14. Alex A. Volinsky, Larry Rice, Wentao Qin, N. David Theodore. FIB failure analysis of memory arrays // Microelectronic Engineering. 2004, 75. P. 3. ([http://volinsky.myweb.usf.edu/VolinskyME\\_FIB.pdf](http://volinsky.myweb.usf.edu/VolinskyME_FIB.pdf))

15. Skorobogatov S.P. Semi-invasive attacks. A new approach to hardware security analysis. Technical report. University of Cambridge. 2005. (<http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-630.pdf>)

16. Reyntjens S. Three Dimensional Micromachining for Microelectromechanical Systems (MEMS). Katholieke Universiteit. Leuven. Belgium. 2002.

17. Young R.J. Micromachining using a focused ion beam // Vacuum, 44, 1993. P. 353-356.

18. Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Исследование локальности и селективности процессов при использовании наноразмерного ионного пучка // Вакуумная техника и технология. Т.19. № 3. 2009. С. 165-172.