

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников**  
**высшей школы по направлению**  
**“ Нанотехнологии для систем безопасности ”**  
**на базе учебного курса**  
**КОРПУСКУЛЯРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИКА**  
(наименование учебного курса)

Цель: ознакомление с новейшими технологическими методами формирования наноструктур, реализуемые при создании современных приборов, функционирующих на основе эффектов размерного квантования.

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 36 часов

Форма обучения с частичным отрывом от работы, дистанционно- очная

Режим занятий 8 часов в день

*Целью и задачами данного курса является* ознакомление с новейшими технологическими методами формирования наноструктур, реализуемые при создании современных приборов, функционирующих на основе эффектов размерного квантования. Значительное внимание уделяется различным современным методам сканирующей зондовой микроскопии, применяющихся как для диагностики, так и для создания наноструктурированных объектов для элементов углеродной, металлической наноэлектроники и наноэлектроники на гетероструктурных квантовых проводках. Рассматриваются основные принципы и применение технологии фокусированных ионных пучков для исследования, создания и модификации наноматериалов, интегральных микросхем, объектов и приборов наноэлектроники.

### **Требования к уровню освоения учебного курса**

Преподаватели должны:

- знать:
  - физическую сущность зондовых и пучковых нанотехнологий, применяемых при формировании гетероструктур для наноэлектроники, оптоэлектроники, микро- и наносистемной техники;
- иметь навыки:
  - правильно выбрать материал, спроектировать и рассчитать технологический процесс получения приборной наноструктуры с заданными свойствами.
- иметь представление о:
  - математических методах анализа и расчета структур и технологических параметров приборов наноэлектроники;
  - современном состоянии, тенденциях развития эпитаксиальных технологий, методов сканирующей зондовой микроскопии для нанолитографии.

Научные работники должны:

- знать:
  - физическую сущность зондовых и пучковых нанотехнологий, применяемых при формировании гетероструктур для наноэлектроники, оптоэлектроники, микро- и наносистемной техники;
- иметь навыки:
  - правильно выбрать материал, спроектировать и рассчитать технологический процесс получения приборной наноструктуры с заданными свойствами;
- иметь представление о:

- математических методах анализа и расчета структур и технологических параметров приборов нанoeлектроники;
- современном состоянии, тенденциях развития эпитаксиальных технологий, методов сканирующей зондовой микроскопии для нанолитографии.

Учебный курс «Корпускулярная технология и диагностика» 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 методы формирования наноструктур, реализуемые при создании современных приборов, функционирующих на основе эффектов размерного квантования. Рассмотрены методы сканирующей зондовой микроскопии, применяющихся как для диагностики, так и для создания наноструктурированных объектов для элементов углеродной, металлической нанoeлектроники и нанoeлектроники на гетероструктурных квантовых проводках. Рассматриваются основные принципы и применение технологии фокусированных ионных пучков для исследования, создания и модификации наноматериалов, интегральных микросхем, объектов и приборов нанoeлектроники.

Теоретическая часть учебного курса состоит из девяти лекций:

### **Лекция 1. Методы диагностики на основе атомно-силовой микроскопии**

Физические основы атомно-силовой микроскопии (АСМ). Потенциал Ленарда-Джонса. Принципы формирования изображения поверхности в АСМ. Аппаратурное обеспечение АСМ. Основные режимы работы АСМ (контактная, бесконтактная и тэппинг-мода, многопроходные методики). Типы зондов атомно-силового микроскопа, их геометрия, основные физические свойства и параметры. Технология производства зондовых датчиков. Классификация зондов по типу покрытия. Зонды специальных назначений. Кантилеверы на нанотрубках. Многозондовые катриджи.

### **Лекция 2. Методы диагностики в атомно-силовой микроскопии**

Классификация методик атомно-силовой микроскопии. Физические основы, принцип работы и области применения режима постоянной силы, режима снятия сил изображения. Регистрация ошибки обратной связи. Латерально-силовая микроскопия, примеры применения данной методики для определения различных фаз на поверхности образца. Картографирование сил адгезии (особенности кривых отвода –подвода и их физическая интерпретация).

Сканирующая микроскопия сопротивления растекания: принцип работы АСМ в данном режиме, физические основы метода, возможности и ограничения. Сканирующая микроскопия сопротивления растекания. Методика определения удельного сопротивления и концентрации носителей заряда по данным сканирующей микроскопии сопротивления растекания. Сканирующая микроскопия пьезоотклика.

Многопроходные методики. Регистрация силовых взаимодействий, обусловленных  $\partial C/\partial Z$ . Метод зонда Кельвина. Бесконтактная емкостная мода. Магнитная силовая микроскопия.

### **Лекция 3. Методы литографии и манипуляции в атомно-силовой микроскопии**

Основные принципы и режимы работы АСМ при литографии. Векторная, растровая литография. Основы силовой литографии (plowing lithography). Влияние параметров сканирования, формы зонда на результаты литографии. Специфика подбора зондов и условий сканирования в силовой литографии.

Физические основы локального анодирования в АСМ. Влияние водного мениска на параметры формируемых нанообъектов. Перьевая нанолитография (Dip-pen nanolithography) Молекулярное и атомарное манипулирование. Создание приборных структур на основе углеродных нанотрубок с помощью манипулирования в атомно-силовой микроскопии.

#### **Лекция 4. Физические основы и методы диагностики в сканирующей туннельной микроскопии**

Принцип действия и физические основы работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Аппаратурное обеспечение сканирующей туннельной микроскопии. Основные режимы СТМ и факторы, влияющие на разрешение метода. Режим постоянного тока. Режим постоянной высоты.

Анализ поверхностных фаз в СТМ. Спектроскопия адсорбированных частиц в СТМ. Методы исследования энергетического спектра полупроводников в СТМ и ЛТС (локальная туннельная спектроскопия).

#### **Лекция 5. Физические эффекты в туннельно-зондовой нанотехнологии**

Физические эффекты, возникающие в СТМ за счет малого радиуса закругления острия зондового датчика. Контактное формирование нанорельефа поверхности подложек. Точечная контактная модификация и выглаживание поверхности металлов игольчатым электродом. Бесконтактное формирование нанорельефа поверхности подложек.

Условия возникновения пластического течения материала под воздействием зонда туннельного микроскопа. Локальная "глубинная" модификация полупроводниковых подложек в туннельном микроскопе. Локальная электродинамическая модификация поверхности подложек.

Межэлектродный массоперенос с нанометровым разрешением. Управление массопереносом. Режим формирования острия иглы.

#### **Лекция 6. Сканирующая зондовая микроскопия в жидкостях**

Общая концепция технологических операций СТМ в жидкостях и газах. Условия зондовой нанотехнологии в вакууме, газах и жидкостях. Влияние газовой среды на массоперенос между игольчатым электродом и подложкой.

Формирование микропроводников в жидких диэлектриках. Формирования проводящих каналов из адсорбата воздуха. Полимерные микропроводники. Электрохимический массоперенос. Фотоэлектрохимическое травление полупроводниковых подложек. Электрохимическое осаждение. Электростимулированная миграция на поверхностях полимеров. Массоперенос с помощью газовой среды. Элементы осаждения металлических пленок из газовой фазы металлорганических соединений (МО CVD) в СТМ.

Модификация свойств среды в зазоре между туннельным зондом и подложкой. Формирование молекулярных мостиков из адсорбата воздуха на подложках. Механизмы проводимости по молекулярным мостикам.

#### **Лекция 7. Ближнепольная микроскопия и литография**

Сканирующая микроскопия ближнего поля: принцип действия и физические основы работы. Аппаратурное обеспечение сканирующей туннельной микроскопии. Типы зондовых датчиков для БСОМ. Устройство волоконнооптического ближнепольного зонда. Разрешающая способность ближнепольного оптического микроскопа. Физические принципы и назначение основных режимов БСОМ. Области применения ближнепольной оптики в микро- и нанoeлектронике. Совмещенные моды БСОМ и сканирующей зондовой микроскопии. Ближнепольная литография.

## **Лекция 8. Комбинационное рамановское рассеяние в сенсорике**

Комбинационное рамановское рассеяние (КР). Эффект гигантского комбинационного рамановского рассеяния (ГКР). Физические основы спектроскопии комбинационного рассеяния. Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния: химический и электромагнитный механизмы. Специфика и различия эффектов КР и ГКР. Делокализованные и локализованные поверхностные плазмоны. Локализованные поверхностные плазмоны (ЛПП). Типы датчиков на основе плазмонных структур. Датчики, регистрирующие изменение оптических свойств плазмонной структуры. Методы изготовления плазмонных наноструктур.

## **Лекция 9. Основы технологии фокусированных ионных пучков (ФИП). ФИП-диагностика**

Физические основы технологии фокусированных ионных пучков. Принцип действия и аппаратное обеспечение приборов для реализации ФИП-технологий. Принципы регистрации и виды контрастов изображений объектов в при сканировании ионным пучком.

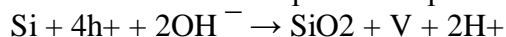
Ионно-стимулированные химические реакции. Применение селективного травления. Модельные представления процессов осаждения. Экспериментальные зависимости основных параметров при травлении и осаждении в ФИП. Формирование платиновых структур осаждением в ФИП-технологии. Осаждение диэлектрических покрытий по ФИП-технологии. Модельные представления осаждения  $\text{Si}_x\text{O}_{1-x}$ . Осаждение нестехиометрического оксида кремния из тетраэтоксисилана в ФИП. Влияние технологических параметров на характеристики формируемых объектов.

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

На дистанционную и очную части учебного курса отводится 23 и 13 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 «Корпускулярная технология и диагностика»**

1. Плуинг-нанолиитография (силовая нанолиитография) основана на прямом силовом воздействии иглы АСМ на поверхность образца. Объясните отличие статической силовой нанолиитографии от динамической силовой нанолиитографии (в обоих методах проводится -пенетрация поверхности).
2. В специальной – литературе приводят данные по локальности линий рисунка при модуляции поверхности образцов методами силовой нанолиитографии (как правило, 5-20 нм). Как зависят размеры линий от:
  - a. Изменения упругих свойств модифицированной поверхности,
  - b. От жесткости иглы,
  - c. От толщины обрабатываемого слоя (при силовой нанолиитографии резиста)?
3. Методом жидкостного локального анодного окисления создаются индивидуальные портреты (с цифровой фотографии) размерами 3 x 3 мкм<sup>2</sup>. размер линий может быть снижен до 5 нм. Рассчитайте сколько «нанофотографий» может быть размещено на срезе человеческого волоса (считать диаметр волоса 100 мкм). Почему нанофотографии лучше всего получают на титановых пластинках?
4. При модификации поверхности Si методом локального анодного окисления из-за естественной влаги на поверхности протекает реакция:



(При этом игла является катодом.  $h^+$  - дырка,  $V$  - вакансия в кристаллической решетке кремния).

Объясните, почему процесс роста оксида самопрекращается?

5. Напишите основную химическую реакцию, протекающую в углеродных – плёнках, при нанолитографии методом локального анодного окисления на воздухе.
6. Почему метод жидкостного локального анодного окисления является основным методом для создания коммутаций и резистов в углеродной наноэлектронике?
7. Рассчитайте минимальные размеры линий, получаемых при сухом локальном анодном окислении в высоком вакууме при использовании в качестве «резиста» адсорбированного водорода. Окисление проводится методом импульсного впрыскивания кислорода. Локальность оценить из условия использования в качестве иглы зонда одностенной углеродной нанотрубки, диаметр которой совпадает с диаметром фуллерена C<sub>60</sub>.
8. Составьте технологическую схему формирования квантового провода с управляемыми геометрическими параметрами при приложении электрического поля (конструкция квантового провода на основе барьера Шоттки со щелью). В качестве метода нанотехнологии выбрать жидкостное локальное анодное окисление.
9. Предложить технологическую схему создания одноэлектронного транзистора в рамках металлической наноэлектроники. Для формирования туннельных зазоров и металлического квантового острова использовать метод локального анодного окисления.
10. Создание дефектов в углеродных нанотрубках – один из перспективных приемов изменения хиральности УНТ в локальных областях субнаноразмеров. Предложите принципиально перспективные способы модификации свойств УНТ методами сканирующей зондовой микроскопии.
11. Составьте химические реакции, протекающие при жидкостном локальном окислении Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Рассмотрите технологию получения наносистемы из квантовых точек, формируемых на полупроводниковой подложке с использованием контактной маски из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.
12. Одним из перспективных направлений наноэлектроники является углеродная наноэлектроника, в которой пассивные элементы изготавливаются из углеродных аморфных пленок, а активными элементами являются МДП- транзисторы на углеродных нанотрубках. В качестве нанотехнологического метода формирования контактов к углеродным нанотрубкам может быть использована перьевая нанолитография. Какими свойствами должны обладать полимерные наночернила?
13. Какими способами обеспечивается «многоцветность» наночернил в перьевой нанолитографии нового поколения?
14. В чем отличие метода сканирующей туннельной микроскопии от сканирующей микроскопии сопротивления растекания? Какие виды модификации поверхностных слоев можно проводить с помощью этих методов?
15. Сканирующая контактная емкостная спектроскопия (наноемкостная спектроскопия) – эффективный метод анализа энергетических уровней в нанобъектах. При анализе элементов кремниевой микро- и наноэлектроники этот метод обеспечивает определение концентрации носителей заряда в динамическом диапазоне 10<sup>14</sup>-10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup> и локальных областях ~100-200нм. В чем принципиальные достоинства метода сканирующей контактной емкостной спектроскопии по сравнению с классической емкостной спектроскопией? Какую функциональную нагрузку несут источники постоянного и переменного напряжения?

16. Рассмотрите возможности сканирующей контактной емкостной спектроскопии для диагностики МОП-транзисторов микро- и наноэлектроники. Каковы возможности этого метода для модернизации поверхности полупроводников?
17. Рассмотрите технологическую схему формирования металлических наночастиц с помощью методов сканирующей зондовой микроскопии путем транспорта металла с острия зонда на поверхность подложки. Каковы перспективы этой технологии для формирования биологических наносенсоров на основе эффекта гигантского комбинационного рамановского рассеяния?
18. Сканирующие зондовые микроскопы могут эксплуатироваться в 4-х режимах: микроскопии, спектроскопии; модификации поверхности и манипулирования. Какие принципиальные черты каждой из этих операций?
19. Сканирующая микроскопия сопротивления растекания позволяет проводить картографию поверхности в аналитическом сигнале по току растекания. В спектроскопии сопротивления растекания получается информация о ВАХ в локальных областях. Однако, для «мягких» полупроводников при приложении действием электрического поля происходит модификация свойств полупроводника, связанная с образованием дефектов кристаллической структуры. В чем особенности комбинированной методики, предложенной в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», позволяющей проводить анализ «мягких» материалов? Какие принципиально новые аналитические и технологические возможности возникают в этой моде при исследовании микро- и наноконтактов металл – полупроводник?
20. Предложите технологические схемы осуществления модификации свойств межзеренных границ методом комбинированной микроскопии сопротивления растекания.
21. В чем принципиальное отличие ближнепольной фотолитографии от традиционной проекционной фотолитографии. Почему в ближнепольной литографии отсутствует дифракционный предел?
22. Сравните возможности модификации поверхности методами апертурной и безапертурной ближнепольных литографий.
23. В чем отличие контактной и полуконтактной мод сканирующей емкостной спектроскопии? Как в тейпинг-моде осуществляется выделение аналитического сигнала по емкости и по значению поверхностного потенциала (режим зонда Кельвина)?
24. С развитием нанотехнологий на основе методов сканирующей зондовой микроскопии выделилось новое перспективное направление сенсорики – наносенсорика, отличающееся не только размерами чувствительных элементов, но и принципиально улучшенными техническими характеристиками. В микроэлектронных газочувствительных сенсорах в интегральном исполнении одними из основных недостатков является слабая селективность сенсоров по отношению к детектируемому восстанавливающему газу и достаточно большая инерционность, достигающая десятков секунд и минут. Несколько лет назад была показана возможность осуществления золь-гель технологии в нанобъемах с использованием коллоидных наночернил в перьевой нанолитографии. Инерционность составляла ~ 1 сек и менее. Спланируйте технологическую схему получения мультианалитической системы с применением наночернил на основе коллоидного раствора, содержащего хлорид олова. Поясните причину резкого уменьшения инертности. Почему в мультисенсорных системах (системы типа «электронный нос») возможно селективное определение детектируемого газа?
25. Предложите технологические приемы на основе использования методов сканирующей зондовой микроскопии для создания нанобиосенсоров и химических наносенсоров. Приведите конкретный пример реакции на основе ферментной реакции «уреаза»-«мочевина» или «..» - «глюкоза».

26. Охарактеризуйте возможности методов силовой нанолитографии для создания технологической оснастки процессов мягкой полимерной нанолитографии (наноимпринтинг). Перечислите основные нанотехнологические достоинства и недостатки методов нанопрессования, создания нанорельефа, метода резкой кромки, нанопечатание.
27. Каковы физические особенности зондовой нанолитографии на основе зарядки поверхности образцов? Сравните с физическими процессами, протекающими в классической ксерографии.
28. Рассмотрите возможности электронной литографии с использованием острия иглы сканирующей зондовой микроскопии. Какими свойствами должен обладать электронорезист?
29. Что такое термостимулированная нанолитография? Рассмотрите методы создания рисунка на термопластичных материалах.
30. Опишите технологические особенности формирования атомных структур методами манипуляции атомами с помощью сканирующей туннельной микроскопии.
31. В чем достоинства и какие принципиальные недостатки созданных структур с записью информации на атомном уровне в полупроводниковых кристаллах?
32. Почему при прямом воздействии иглы сканирующего зондового микроскопа на углеродную трубку удастся изменить ее конфигурацию? Какие устройства в нанoeлектронике и наносистемной технике можно формировать, используя нанотехнологии, основанные на манипуляции атомами, фуллеренами и углеродными нанотрубками?
33. Сколько времени потребуется для экспонирования ионного резиста ПММА с дозой  $100 \text{ мкКл/см}^2$  ионным пучком с током  $100 \text{ пА}$  при шаблоне площадью  $100 \text{ мкм}^2$ ?
34. Определить время работы жидкометаллического источника ионов до полного израсходования запаса галлия, если считать что масса галлия  $1 \text{ мг}$ , а рабочий ток источника ионов  $2 \text{ мкА}$ . Плотность  $\rho = 5,904 \text{ г/см}^3$ ,  $M_{\text{Ga}} = 69,72 \text{ о.а.е.}$
35. Сколько времени потребуется, чтобы довести галлий в жидкометаллическом источнике ионов от комнатной температуры до температуры плавления, если его нагревать мощностью  $1 \text{ Вт}$ . Масса галлия в источнике  $1 \text{ г}$ , температура плавления  $29,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , теплоёмкость  $C_{\text{Ga}} = 376,7 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Считать, что тепло не рассеивается и идёт только на нагрев рабочего вещества в источнике.
36. Какое боковое ускорение в магнитном поле Земли ( $0,1 \text{ А/м}$ ) будет испытывать движущийся ион галлия после ускорения напряжением  $30 \text{ кВ}$ ?  $\mu_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $M_{\text{Ga}} = 69,72 \text{ о.а.е.}$
37. Какую амплитуду отклонения будет иметь ионный пучок галлия, ускоренный напряжением  $30 \text{ кВ}$ , если амплитуда отклоняющего напряжения  $\pm 1 \text{ кВ}$ ? Считать, что отклоняющее напряжение равномерно действует на уже ускоренный ион на протяжении длины отклоняющих электродов  $10 \text{ см}$ .
38. Пучок ионов лития, предварительно ускоренный напряжением  $30 \text{ кВ}$ , проходит через апертурную щель диаметром  $1 \text{ мкм}$ . Определить величину квантовой неопределённости координаты в плоскости мишени при падении по нормали, если считать что расстояние до мишени  $10 \text{ см}$ .
39. Определить время пролёта иона бора от источника до мишени при ускоряющем напряжении  $50 \text{ кВ}$ , считая электрическое поле постоянным на всей длине пролёта, которая равна  $1 \text{ м}$ .
40. Пучок ионов галлия падает на мишень. Определить поперечный разброс ионов по координате вызванный тепловым разбросом скоростей. Время пролёта иона от источника до мишени –  $20 \text{ нс}$ .
41. Подложка кремний на изоляторе площадью  $40 \text{ см}^2$  и толщиной приборного кремния  $1 \text{ мкм}$  легируется однократно заряженными ионами с током  $1 \text{ мкА}$  в

- течение 1 мин. Определить результирующую концентрацию легирования приборного кремния  $d$  предположении равномерного распределения примеси.
42. Поток ионов с величиной тока 2 мкА излучается источником в форме конуса с углом расходимости  $2\alpha=1^\circ$ . На расстоянии 1 см установлена отсекающая апертура, имеющая диаметр отверстия 100 мкм. Какая величина тока в пучке будет получена после апертуры, если предполагать, что плотность тока падающих ионов, равномерна по плоскости апертуры?
43. Какая удельная поверхностная доза получается на поверхности подложки после однократного растрового сканирования изображения ионным током 1 нА с длительностью 200 мс? При этом был установлен коэффициент увеличения изображения 10000 крат, а само изображение на мониторе имело размер 20x20 см.

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

1. Принцип действия и основные блоки атомно-силового микроскопа.
2. Ход зависимости потенциала Ленарда-Джонса. Условия работы в контактной, бесконтактной и полуконтактной модах атомно-силового микроскопа.
3. Кантилеверы – основные физические свойства, классификация, характеристики и технология получения.
4. Зондовые датчики специального назначения. Многозондовые катриджи.
5. Контактные методики исследования в атомно-силовой микроскопии. Основные принципы формирования изображения поверхности в АСМ.
6. Физические принципы и области применения латерально-силовой микроскопии. Фазовый анализ на основе ЛСМ.
7. Сканирующая микроскопия сопротивления растекания: основные принципы, приборная реализация, требования к кантилеверам.
8. Сканирующая микроскопия сопротивления растекания элементов ИМС.
9. Методики исследования в полуконтактном режиме работы АСМ.
10. Многопроходные методики АСМ. Магнитная силовая микроскопия.
11. Метод зонда Кельвина. Специфика определения работы выхода в методе зонда Кельвина.
12. Сканирующая емкостная микроскопия.
13. Электростатическая силовая микроскопия.
14. Формирование нанообъектов методом силовой АСМ -литографии.
15. Физические основы локального анодирования в АСМ. Влияние водного мениска на параметры формируемых нанообъектов.
16. Перьевая нанолитография (Dip-pen nanolithography)
17. Молекулярное и атомарное манипулирование в АСМ и СТМ.
18. Создание приборных структур на основе углеродных нанотрубок с помощью манипулирования в атомно-силовой микроскопии.
19. Принцип действия и физические основы работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ).
20. Аппаратурное обеспечение сканирующей туннельной микроскопии. Зонды для СТМ и методы их заточки.
21. Основные режимы СТМ и факторы, влияющие на разрешение метода. Режим постоянного тока. Режим постоянной высоты.
22. Анализ поверхностных фаз в СТМ.
23. Спектроскопия адсорбированных частиц в СТМ.
24. Методы исследования энергетического спектра полупроводников в СТМ и ЛТС (локальная туннельная спектроскопия).
25. Физические эффекты, возникающие в СТМ за счет малого радиуса закругления острия зондового датчика.



26. Контактное формирование нанорельефа поверхности подложек. Точечная контактная модификация и выглаживание поверхности металлов игольчатым электродом.
27. Бесконтактное формирование нанорельефа поверхности подложек.
28. Условия возникновения пластического течения материала под воздействием зонда туннельного микроскопа. Локальная "глубинная" модификация полупроводниковых подложек в туннельном микроскопе.
29. Локальная электродинамическая модификация поверхности подложек.
30. Межэлектродный массоперенос с нанометровым разрешением.
31. Управление массопереносом. Режим формирования острия иглы.
32. Технологические операции СТМ в жидкостях и газах. Условия зондовой нанотехнологии в вакууме, газах и жидкостях.
33. Влияние газовой среды на массоперенос между игольчатым электродом и подложкой.
34. Формирование микропроводников в жидких диэлектриках.
35. Формирования проводящих каналов из адсорбата воздуха. Полимерные микропроводники.
36. Электрохимический массоперенос. Фотоэлектрохимическое травление полупроводниковых подложек. Электрохимическое осаждение.
37. Электростимулированная миграция на поверхностях полимеров.
38. Массоперенос с помощью газовой среды.
39. Элементы осаждения металлических пленок из газовой фазы металлорганических соединений (МО CVD) в СТМ.
40. Модификация свойств среды в зазоре между туннельным зондом и подложкой.
41. Формирование молекулярных мостиков из адсорбата воздуха на подложках. Механизмы проводимости по молекулярным мостикам.
42. Сканирующая микроскопия ближнего поля: принцип действия и физические основы работы. Аппаратурное обеспечение сканирующей туннельной микроскопии.
43. Типы зондовых датчиков для БСОМ. Устройство волоконнооптического ближнепольного зонда. Разрешающая способность ближнепольного оптического микроскопа. Физические принципы и назначение основных режимов БСОМ.
44. Области применения ближнепольной оптики в микро- и нанoeлектронике.
45. Совмещенные моды БСОМ и сканирующей зондовой микроскопии. Ближнепольная литография.
46. Физические основы спектроскопии комбинационного рассеяния. Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния: химический и электромагнитный механизмы.
47. Делокализованные и локализованные поверхностные плазмоны. Локализованные поверхностные плазмоны (ЛПП).
48. Типы датчиков на основе плазмонных структур. Датчики, регистрирующие изменение оптических свойств плазмонной структуры.
49. Методы изготовления плазмонных наноструктур.
50. Физические основы технологии фокусированных ионных пучков. Принцип действия и аппаратурное обеспечение приборов для реализации ФИП-технологий.
51. Ионно-стимулированные химические реакции. Применение селективного травления.
52. Формирование платиновых структур осаждением в ФИП-технологии.
53. Осаждение диэлектрических покрытий по ФИП-технологии. Осаждение нестехиометрического оксида кремния из тетраэтоксисилана в ФИП.
54. Методы диагностики материалов с помощью ФИП.

55. Принципы формирования микроструктур в ФИП. Препарирование полупроводниковых гетероструктур.

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  
«Корпускулярная технология и диагностика»**

1. Применение ионного селективного травления
2. Молекулярное и атомарное манипулирование
3. Термическая нанолитография.
4. Ближнепольная литография
5. Электронно-лучевая СЗМ литография
6. Перьевая нанолитография (Dip-pen nanolithography)
7. Локальное оксидирование
8. Массоперенос с помощью газовой среды
9. Электрохимический массоперенос
10. Формирование микропроводников в жидких диэлектриках.
11. Формирование молекулярных мостиков из адсорбата воздуха на подложках
12. Межэлектродный массоперенос с нанометровым разрешением
13. Локальная электродинамическая модификация поверхности подложек
14. Локальная "глубинная" модификация полупроводниковых подложек в туннельном микроскопе
15. Бесконтактное формирование нанорельефа поверхности подложек. Контактное формирование нанорельефа поверхности подложек
16. Физические эффекты в туннельно-зондовой нанотехнологии

**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	
	«Корпускулярная технология и диагностика»	36 ч.	18,5 ч.	4,5 ч.	13 ч.	Контрольные вопросы (электронная

1.	Лекция 1. Методы диагностики на основе атомно-силовой микроскопии		2 ч.	0,5 ч.		зачётка) Реферат
2.	Лекция 2. Методы диагностики в атомно-силовой микроскопии		2 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3. Методы литографии и манипуляции в атомно-силовой микроскопии		2 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4. Физические основы и методы диагностики в сканирующей туннельной микроскопии		2 ч.	0,5 ч.		
5	Лекция 5. Физические эффекты в туннельно-зондовой нанотехнологии		2 ч.	0,5 ч		
6	Лекция 6. Сканирующая зондовая микроскопия в жидкостях		2 ч.	0,5 ч		
7	Лекция 7. Ближнепольная микроскопия и литография		2 ч.	0,5 ч		
8	Лекция 8. Комбинационное рамановское рассеяние в сенсорике		2 ч.	0,5 ч		
9	Лекция 9. Основы технологии фокусированных ионных пучков (ФИП). ФИП-диагностика		2,5 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**

1. Мошников В.А., Федотов А.А., Румянцева А.И. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро- и наноэлектронике. Учеб. пос. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003г.
2. Александрова О.А., Мошников В.А. Физика и химия материалов оптоэлектроники и наноэлектроники. Практикум. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007г.
3. Сорокин В.С., Мошников В.А., Разбегаев В.Н., Румянцева А.И. Инжекционные лазеры. Учебное пособие - СПб ГЭТУ, «ЛЭТИ», 1999
4. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем – С-Пб., Наука, 2001
5. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005г.
6. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии М.: Техносфера, 2005г.
7. Справочник по электротехническим материалам Т.3/ Под редакцией Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева – Л. Энергоатомиздат, 1988
8. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. В.В. Лучина, Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит. 2006г
9. Ильин В.И., Мусихин С.Ф., Шик А.Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры – С-Пб, Наука, 2000.
10. Кузнецов В.В., Москвин П.П., Сорокин В.С. Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов – М.: Металлургия, 1991.
11. Стрельченко С.С., Лебедев В.В. Соединения АЗВ5. Справочник. – М.: Металлургия, 1984.
12. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах – М., Мир, 1981 ( т. 1, .2) .
13. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников, т.32, вып.3, 1998
14. Ivanov S.V., Kor'ev P.S. "Type-II AlGaSb/InAs Quantum well structures and superlattices for opto- and microelectronics grown by molecular beam epitaxy"/ in "Antimonide-related strained -layer heterostructures", ed. by M.O. Manasreh, Ch. 4, vol. 3. in Ser. "Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices" (Gordon & Breach Science Publisher, 1997) , pp. 95-170
15. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований / Под ред. М.К.Роко, Р.С.Уильямса, П.Аливисатоса. Пер. с англ. М.: Мир, 2002г.
16. Перст (перспективные технологии). Информац. бюллетень <http://perst.issph.kiae.ru>
17. Materials Today <http://www.materialstoday.com/home.htm>
18. Microscopy and Analysis [www.microscopy-analysis.com](http://www.microscopy-analysis.com)