

“СОГЛАСОВАНО”

“СОГЛАСОВАНО”

Ректор СПбГЭТУ

Директор ГИНФО

\_\_\_\_\_ / Кутузов В. М. /

\_\_\_\_\_ /Алексеев К. П./

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников**  
**высшей школы по направлению**  
**“ Нанотехнологии для систем безопасности ”**  
**на базе учебного курса**  
**МЕТОДЫ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ**  
(наименование учебного курса)

Цель: ознакомление с новейшими методами формирования и диагностики 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 методами формирования и диагностики 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.

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;
  - иметь представление о 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 наноэлектроники;
  - иметь представление о современном состоянии, тенденциях развития эпитаксиальных технологий, методов сканирующей зондовой микроскопии для нанолитографии.

Учебный курс «Методы сканирующей зондовой микроскопии» 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 наноэлектроники и наноэлектроники на гетероструктурных квантовых проводках. Теоретическая часть учебного курса состоит из семи лекций:

### **Лекция 1. Основы атомно-силовой микроскопии**

Физические основы атомно-силовой микроскопии (АСМ). Потенциал Леннарда-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 (MO 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.

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

На дистанционную и очную части учебного курса отводится 18 и 18 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 «Методы сканирующей зондовой микроскопии»**

#### **Лекция 1. Основы атомно-силовой микроскопии.**

1. Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации (продолжить):

- |   |   |
|---|---|
| А) Величины туннельного тока, протекающего между острым зондом и поверхностью исследуемого материала через туннельный барьер между ними | Б) Результата взаимодействия электромагнитного излучения с малым (наноразмерным) объектом, находящимся в ближнем световом поле, которое локализовано на расстояниях много меньших $\lambda$ |
| В) Силы взаимодействия острого зонда с поверхностью исследуемого материала  |   |

2. Какие силы действуют на зондовый датчик при работе атомно-силового микроскопа в контактном режиме?

- |  |  |
|--|--|
| А) Сила отталкивания между зондом и поверхностью                             | Б) Сила Ван-дер-Ваальса  |
| В) Сила упругости кантилевера, сила отталкивания между зондом и поверхностью | Г) Сила отталкивания между зондом и поверхностью, сила упругости кантилевера, сила капиллярности |

3. Какую информацию содержит изображение поверхности в фазовом контрасте при проведении измерений в полуконтактном режиме (в случае, когда обратная связь

поддерживает постоянной изменение амплитуды колебаний зондового датчика)?

А) Информацию о химическом составе поверхности

Б) Информацию о количестве физико-химических фаз на поверхности исследуемого объекта

В) Смешанную информацию о количестве физико-химических фаз на поверхности исследуемого объекта, о вязкоупругих свойствах поверхности, о мелких неоднородностях рельефа

Г) Информацию о распределении поверхностного потенциала

4. При работе атомно-силового микроскопа в полуконтактном режиме рекомендуется выбирать зондовые датчики со следующими характеристиками:

А) Высокими значениями константы упругости кантилевера

Б) Низкими значениями константы упругости кантилевера

В) С Т-образной формой кантилевера

Г) Не имеет значения

5. В некоторых методиках атомно-силовой микроскопии необходимо минимизировать вклад рельефа. Для этого осуществляется два и более прохода (скана) по одной и той же условной линии на исследуемой поверхности. Каким образом в таких многопроходных методиках уменьшают вклад рельефа?

А) На втором проходе зондовый датчик отодвигается от поверхности на некоторое расстояние  $dZ$ , затем датчик движется горизонтально над исследуемой поверхностью

Б) На втором проходе зондовый датчик отодвигается от поверхности на некоторое расстояние  $dZ$ , затем датчик движется над исследуемой поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца, зарегистрированного на первом проходе

В) На втором проходе зондовый датчик отодвигается от поверхности на некоторое расстояние  $dZ$ , затем датчик движется над исследуемой поверхностью по траектории, противоположной рельефу образца, зарегистрированного на первом проходе

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

1. Будет ли влиять морфология поверхности исследуемого объекта на результат измерений при прочих равных условиях при проведении спектроскопии сил адгезии?

А) Да

Б) Да, но только на количественные значения

В) Нет

2. В латерально-силовой микроскопии аналитическим сигналом является:

А) Величина изгиба кантилевера в нормальном направлении (перпендикулярно поверхности)

Б) Величина торсионного изгиба кантилевера (в боковом направлении)

- В) Ошибка обратной связи в контактном режиме      Г) Разность величины вертикального изгиба кантилевера на прямом и обратном проходе в каждой точке изображения поверхности

3. Как влияет увеличение влажности воздуха в рабочем объеме атомно-силового микроскопа на величину аналитического сигнала (сигнала по току) при проведении измерений по методу сканирующей микроскопии сопротивления растекания?

- А) Сигнал по току увеличивается      Б) Уровень влажности не влияет на сигнал по току  
В) Сигнал по току уменьшается

4. С помощью каких методов атомно-силовой микроскопии можно определить концентрацию носителей заряда в полупроводнике (с учетом проведения необходимых работ по калибровке)?

- А) Сканирующая емкостная микроскопия      Б) Сканирующая микроскопия сопротивления растекания  
В) Метод зонда Кельвина      Г) Сканирующая контактная емкостная микроскопия  
Д) Сканирующая емкостная микроскопия; метод зонда Кельвина; электростатическая силовая микроскопия      Е) Сканирующая емкостная микроскопия; сканирующая микроскопия сопротивления растекания; сканирующая контактная емкостная микроскопия

5. Какую информацию содержит изображение поверхности, полученное в режиме магнитно-силовой микроскопии?

- А) Качественную информацию о распределении вертикальной составляющей градиента магнитных сил по поверхности образца      Б) Количественную информацию о распределении вертикальной составляющей градиента магнитных сил по поверхности образца  
В) Качественную информацию о распределении латеральной составляющей градиента магнитных сил по поверхности образца      Г) Количественную информацию о распределении латеральной составляющей градиента магнитных сил по поверхности образца

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

1. От каких условий зависит толщина линии, сформированной по методу силовой литографии?

- А) От жесткости кантилевера и обрабатываемой поверхности      Б) От силы прижима зондового датчика к обрабатываемой поверхности

- В) От жесткости кантилевера, обрабатываемой поверхности и от силы прижима зондового датчика к обрабатываемой поверхности
- Г) От полярности и величины напряжения, приложенного между зондовым датчиком и обрабатываемой поверхностью
- Д) От жесткости кантилевера и обрабатываемой поверхности, а также от влажности воздуха в рабочем объеме
- Е) От жесткости кантилевера и обрабатываемой поверхности, а также от влажности воздуха в рабочем объеме, полярности и величины напряжения, приложенного между зондовым датчиком и обрабатываемой поверхностью

2. Как влияет увеличение влажности воздуха на толщину линии, полученной в процессе локального анодного окисления?

- А) Толщина линии уменьшится
- Б) Толщина линии увеличится
- В) Не влияет

3. Как будет отличаться ширина линий, полученных при проведении локального анодного окисления на гидрофобной и гидрофильной поверхностях (при прочих равных условиях эксперимента)?

- А) Ширина линии на гидрофильной поверхности будет больше
- Б) Ширина линии на гидрофобной поверхности будет больше
- В) Ширина линий будет одинакова

4. За счет сил происходит транспортировка молекул чернил в методе перьевой нанолитографии?

- А) Электростатических
- Б) Гравитационных
- В) Магнитных
- Г) Капиллярных
- Д) Ван-дер-Ваальса

5. За счет чего будет удерживаться в заданном положении углеродная нанотрубка при проведении манипуляции с помощью атомно-силовой микроскопии на поверхности металла или полупроводника?

- А) За счет низкой температуры подложки ( $\approx 4$  К), на которой происходит манипуляция
- Б) За счет низкой температуры подложки ( $\approx 4$  К) и проведения манипуляции в условиях сверхвысокого вакуума
- В) За счет электростатических сил между подложкой и углеродной нанотрубкой
- Г) За счет сил Ван-дер Вальса между подложкой и углеродной нанотрубкой
- Д) За счет сил капиллярности
- Е) За счет хемосорбции

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

1. Какой физический принцип положен в основу работы сканирующего туннельного микроскопа?

- А) Полевая эмиссия
- Б) Ван-дер-Ваальсово взаимодействие
- В) Вакуумное туннелирование
- Г) Электростатическое взаимодействие

2. Зондом в сканирующем туннельном микроскопе является:

- А) Зондовый датчик, состоящий из чипа, кантилевера и атомарно-острого зонда
- Б) Заостренное оптическое волокно, наружная поверхность которого, за исключением вершины конуса, покрыта непрозрачным слоем металла
- В) Зондовый датчик, состоящий из чипа, кантилевера и атомарно-острого зонда с магнитным покрытием
- Г) Тонкое металлическое острие
- Д) Тонкое диэлектрическое острие
- Е) Тонкое магнитное острие

3. Для исследования каких материалов применим метод сканирующей туннельной микроскопии?

- А) Для полупроводников и диэлектриков
- Б) Для металлов и полупроводников
- В) Для всех неорганических материалов
- Г) Для любых материалов

4. Будут ли отличаться изображения поверхности, полученные с помощью сканирующего туннельного микроскопа при различной полярности напряжения, приложенного между зондом и исследуемой поверхностью?

- А) Да, изображения будут содержать принципиально различную информацию
- Б) Нет
- В) Да, но не значительно, в пределах приборной погрешности

5. Какую информацию содержит вольт-амперная характеристика полупроводника, полученная по методу локальной туннельной спектроскопии (в случае чистой поверхности: на поверхности полупроводника отсутствуют адсорбированные атомы)?

- А) Информацию о положении краев зоны проводимости и валентной зоны относительно уровня Ферми
- Б) Информацию о типе электропроводности и концентрации свободных носителей заряда
- В) Информацию о положении краев зоны проводимости и валентной зоны относительно уровня Ферми, а также примесные состояния внутри запрещенной зоны полупроводников
- Г) Информацию о концентрации оборванных связей на поверхности полупроводника



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

1. За счет каких основных факторов, связанных с малым радиусом закругления зонда, возможно проведение модификации поверхности с помощью сканирующего туннельного микроскопа?

А) Локальные электрические поля, сравнимые с внутримолекулярными и атомными

В) Высокие значения механического давления в области под зондом

Д) Варианты А, Б, В

Ж) Варианты А, Б

Б) Сверхбольшие плотности токов и их электродинамическое воздействие

Г) Сверхплотные локальные потоки тепла, вызванные протекающими токами

Е) Варианты А, Б, Г

З) Варианты Б, Г

2. При контактном формировании нанорельефа поверхности подложек с помощью сканирующего туннельного микроскопа, чтобы избежать модификации острия зонда, к материалам подложки и зонда предъявляются следующие требования:

А) Напряжение начала пластической деформации зонда должно быть ниже аналогичного напряжения для подложки

В) Напряжения начала пластической деформации зонда и подложки должны быть приблизительно равны

Б) Напряжение начала пластической деформации зонда должно превышать аналогичное напряжение для подложки

3. При проведении локальной электродинамической модификации поверхности подложки с помощью сканирующего туннельного микроскопа одним из сопровождающих эффектов будет локальный разогрев подложки. Как такое повышение температуры будет влиять на пороговое значение напряжения начала пластического течения материала подложки?

А) Повышается

Б) Снижается

В) Не зависит от температуры обрабатываемого материала

4. С помощью сканирующего туннельного микроскопа возможно осаждение металла на поверхность подложки за счет автоэмиссионного (полевого) испарения. Напряжение какой полярности необходимо подать на зонд?

А) Положительное

Б) Отрицательное

5. Будет ли происходить изменение геометрических параметров острия зонда сканирующего туннельного микроскопа при изменении рельефа поверхности подложки с помощью автоэмиссионного метода?

А) Да

Б) Нет

## Лекция 6. Сканирующая зондовая микроскопия в жидкостях

1. Какой технологический прием может быть использован для поддержания приемлемой чистоты поверхностей подложек как альтернатива вакуумированию?

А) Применение защитного газа при давлении, меньшем чем атмосферное

Б) Применение защитного газа при избыточном давлении по сравнению с атмосферным является

В) Для поддержания приемлемой чистоты поверхностей альтернативы вакуумированию нет

2. В диэлектрической матрице с помощью туннельного микроскопа можно создавать полимерные микропроводники с металлическими электродами, проводимость которых отличается от проводимости матрицы по крайней мере на 18 порядков. За счет чего происходит значительное снижение сопротивления диэлектрика между подложкой и зондом?

А) В жидком диэлектрике, помещенном в локальное электрическое поле между подложкой и игольчатым электродом – зондом, происходит образование молекулярных мостиков, ориентированных вдоль линий напряженности электрического поля, – каналов проводимости.

Б) За счет токов смещения, индуцированных в области диэлектрика между подложкой и игольчатым электродом – зондом, где высока напряженность электрического поля.

В) В тонком диэлектрике при приложении отрицательного напряжения к игольчатому электроду – зонду, происходит инжекция электронов в область диэлектрика между подложкой и зондом, за счет чего происходит образование проводящих каналов.

3. Между зондом сканирующего туннельного микроскопа и поверхностью образца могут формироваться молекулярные мостики из полимолекулярного адсорбата. Почему при превышении некоторого значения скорости удаления зонда от поверхности (при прочих равных условиях эксперимента) мостики не образуются?

А) Из-за шероховатости поверхности подложки

Б) Из-за малого радиуса закругления зонда сканирующего туннельного микроскопа

В) Из-за ограничений, связанных со скоростью движения пьезосканера в направлении, перпендикулярном поверхности

Г) Из-за вязкости атмосферного адсорбата

4. При реализации какого из механизмов проводимости сопротивление молекулярного мостика, индуцированного из полимолекулярного адсорбата на поверхности подложки между зондом сканирующего туннельного микроскопа и подложкой, не будет зависеть от длины самого мостика?

- А) Волноводный баллистический режим проводимости      Б) Резонансное туннелирование

5. В сканирующей электрохимической туннельной микроскопии в качестве электролита может быть использован слой полимера на поверхности подложки. Для протекания электрохимической реакции в межэлектродном зазоре между зондом и подложкой какими свойствами должен обладать такой полимер?

- А) Полимер должен находиться в кристаллическом состоянии      Б) Полимер должен находиться в аморфном состоянии
- В) Полимер должен содержать не связанные с молекулярными цепочками анионы или катионы, свободно перемещающиеся в матрице      Г) В состав полимерных цепей должны входить ионы металлов

### Лекция 7. Ближнепольная микроскопия и литография

1. Принцип работы сканирующего ближнепольного микроскопа основан на регистрации (продолжить):

- А) Величины туннельного тока, протекающего между острым зондом и поверхностью исследуемого материала через туннельный барьер между ними      Б) Результата взаимодействия электромагнитного излучения с малым (наноразмерным) объектом, находящимся в ближнем световом поле, которое локализовано на расстояниях много меньших  $\lambda$
- В) Силы взаимодействия острого зонда с поверхностью исследуемого материала

2. Зондом в сканирующей ближнепольной микроскопии является:

- А) Зондовый датчик, состоящий из чипа, кантилевера и атомарно-острого зонда      Б) Заостренное оптическое волокно, наружная поверхность которого, за исключением вершины конуса, покрыта непрозрачным слоем металла
- В) Зондовый датчик, состоящий из чипа, кантилевера и атомарно-острого зонда с магнитным покрытием      Г) Тонкое металлическое острие
- Д) Тонкое диэлектрическое острие      Е) Тонкое магнитное острие

3. Каким будет ожидаемое предельное разрешение  $\Delta x_{\min}$  для зонда сканирующего ближнепольного микроскопа с алюминиевым покрытием в видимом диапазоне спектра?

А)  $\approx 100\text{-}200$  нм

Б)  $\approx 56$  нм

В)  $\approx 13$  нм

Г)  $\geq 1$  нм

4. При работе сканирующего ближнепольного микроскопа в режиме нарушенного полного внутреннего отражения регистрация оптического излучения происходит следующим образом:

А). Излучение вводится в зазор «световолоконный зонд – поверхность» образца внешним источником, а собирается зондом;

Б). Излучение вводится в зазор «световолоконный зонд – поверхность» через зонд и собирается им же;

В). Излучение вводится в зазор «световолоконный зонд – поверхность» через зонд, а собирается объективом;

Г). Поверхностная световая волна, сформированная в процессе полного внутреннего отражения на поверхности прозрачного образца, туннелирует в световолоконный зонд и регистрируется приемной системой;

Д). Излучение вводится со стороны прозрачного образца и собирается зондом.

5. При освещении исследуемого объекта через зонд сканирующего ближнепольного микроскопа только  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  часть светового потока попадает на образец. С чем это связано?

А) Основная часть излучения рассеивается на стенках оптоволоконна зонда

Б) Основная часть излучения отражается от стенок оптоволоконна зонда обратно

В) Основная часть излучения поглощается металлическим покрытием зонда

Г) Основная часть излучения рассеивается при выходе из оптоволоконна зонда

### **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 кантилверам.
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 (MO 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.

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 «Методы сканирующей зондовой микроскопии»**

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	
	«Методы сканирующей зондовой микроскопии»	36 ч.	14ч.	4 ч.	18 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачетка)
1.	Лекция 1. Основы		2 ч.	0,5 ч.		

	атомно-силовой микроскопии					Реферат
2.	Лекция 2. Методы диагностики в атомно-силовой микроскопии		2 ч.	1,0 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		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы (электронная зачётка)	Реферат	

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

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. Лучинина, 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., Kop'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)
19. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: Учеб.пос.СПб:Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009г.