

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных**  
**работников высшей школы по направлению**  
**«Методы диагностики и исследования наноструктур»**  
**на базе учебного курса**  
**«Измерение рельефа поверхности с помощью атомно-силового**  
**микроскопа»**

Цель: изучение физических принципов функционирования, устройства и основных методов измерения рельефа поверхности с помощью атомно-силового микроскопа.

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 24 часа

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

*Целью данного курса* является ознакомление с физическими принципами функционирования и устройством атомно-силового микроскопа, а также основными методами измерения рельефа поверхности.

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

Преподаватели должны:

- Знать:
  - область применения атомно-силовой микроскопии (АСМ) для измерения рельефа;
  - физические принципы работы АСМ;
  - устройство атомно-силового микроскопа;
  - методы измерения рельефа поверхности с помощью АСМ.
- Иметь навыки:
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения АСМ для измерения рельефа поверхности;
  - включать приобретенные знания о АСМ в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
  - переносить полученные знания о АСМ на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
  - о методах калибровки АСМ для корректного измерения рельефа поверхности;
  - о процедуре установки зондового датчика и настройки оптической регистрирующей системы;
  - о процедуре настройки атомно-силового микроскопа для измерения рельефа поверхности с помощью контактного квазистатического и полуконтактного колебательного методов;
  - о предельном разрешении АСМ;
  - о потенциалах взаимодействия зонда с образцом;
  - о задаче Герца;
  - о теории поверхностного натяжения;
  - о силах Ван-дер-Ваальса для зонда различной формы;
  - о моделях адгезии твердых тел.

Научные работники должны:

- 1. Знать:
  - область применения АСМ для измерения рельефа;
  - физические принципы работы АСМ;
  - устройство атомно-силового микроскопа;

- методы калибровки АСМ для корректного измерения рельефа поверхности;
- методы измерения рельефа поверхности с помощью АСМ.
- 2. Иметь навыки:
  - установки зондового датчика и настройки оптической регистрирующей системы;
  - настройки атомно-силового микроскопа для измерения рельефа поверхности с помощью контактного квазистатического и полуконтактного колебательного методов;
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения АСМ для измерения рельефа поверхности;
  - планирования и проведения исследований и экспериментов с использованием АСМ для измерения рельефа поверхности;
  - генерировать новые плодотворные научно-технические и инновационные идеи с использованием АСМ;
  - переносить полученные знания о применении АСМ для измерения рельефа поверхности на смежные предметные области и к использованию этих знаний для создания новых объектов техники и технологии и для инновационной деятельности;
- 3. Иметь представление:
  - о предельном разрешении АСМ;
  - о потенциалах взаимодействия зонда с образцом;
  - о задаче Герца;
  - о теории поверхностного натяжения;
  - о силах Ван-дер-Ваальса для зонда различной формы;
  - о моделях адгезии твердых тел.

Учебный курс «Измерение рельефа поверхности с помощью атомно-силового микроскопа» 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 лаборатории в Московском физико-техническом институте.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы силового взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с поверхностью исследуемого образца, устройство атомно-силового микроскопа, суть контактного квазистатического и полуконтактного колебательного методов измерения рельефа поверхности, условия эксперимента, влияющие на вертикальное и латеральное разрешения атомно-силового микроскопа, а также принципы калибровки атомно-силового микроскопа для корректного измерения рельефа поверхности.

Теоретическая часть учебного курса состоит из семи лекций:

Лекция 1: Физические принципы работы АСМ. Часть 1: Силовое взаимодействие зонда с поверхностью. Потенциал взаимодействия зонда с образцом. Режимы работы АСМ

Потенциал взаимодействия Леннарда-Джонса. Упругие взаимодействия. Постановка и решение задачи Герца. Контактное давление. Разрушение поверхностей зонда и образца. Капиллярная сила, действующая на зонд. Основные положения теории поверхностного натяжения. Формула Лапласа. Межмолекулярная сила Ван-дер-Ваальса: ориентационное, индукционное и дисперсионное взаимодействия. Ван-дер-ваальсовское притяжение зонда различной формы (параболоид, конус, пирамида) к образцу. Адгезионные силы. Физическая природа адгезии. Модели DMT, JKR и Маугиса адгезии твердых тел.

Лекция 2: Физические принципы работы АСМ. Часть 2: Линейные колебания кантилевера

Собственные колебания. Колебания при наличии сил трения. Аперриодическое, периодическое движение кантилевера, критическое затухание. Добротность кантилевера. Колебания при наличии внешней вынуждающей периодической силы: идеальный случай и при наличии трения. Малые колебания кантилевера в силовом поле. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики кантилевера. Изменение фазы, амплитуды и частоты колебаний в силовом поле. Кривые подвода зонда к образцу.

Лекция 3: Устройство АСМ

Общая схема взаимодействия основных элементов микроскопа Ntegra. Конструкция датчика силового взаимодействия: кантилевер и зонд атомно-силового микроскопа. Измерительная головка АСМ. Оптическая система регистрации отклонений кантилевера. Сканирующие элементы (сканеры) зондовых микроскопов. Конструкции пьезосканеров. Трубочный пьезоэлемент, трипод. Недостатки пьезосканеров: нелинейность, гистерезис, ползучесть (крип), температурный дрейф. Сканеры с датчиками перемещений. Емкостные датчики для X,Y сканеров. Система обратной связи. Коэффициент усиления обратной связи. PID-регулятор.

#### Лекция 4: Измерительные методики. Измерение рельефа поверхности с использованием контактного квазистатического метода

Обзор основных методов АСМ. Однопроходные и многопроходные методы, зондовая нанолитография. Контактный метод работы. Измерение рельефа поверхности методом постоянной высоты и методом постоянной силы. Закон Гука. Схема петли обратной связи в контактном методе. Метод латеральных сил. Зависимость сигнала DFL от смещения кантилевера вдоль вертикальной оси (контактные кривые повода-отвода). Определение абсолютного значения силы взаимодействия зонда с образцом. Достоинства и недостатки контактного метода АСМ.

#### Лекция 5: Измерение рельефа поверхности с использованием полуконтактного колебательного метода

Принцип работы АСМ в полуконтактном колебательном методе. Раскачка кантилевера. Обработка переменного сигнала DFL. Сигналы MAG, MAGsin, MAGcos, RMS, Phase. Схема петли обратной связи в полуконтактном методе. Преимущества полуконтактного метода. Зависимость сигнала MAG от смещения кантилевера вдоль вертикальной оси (полуконтактные кривые повода-отвода). Определение абсолютного значения амплитуды колебаний кантилевера. Бесконтактный метод работы АСМ.

#### Лекция 6: Предельное разрешение АСМ

Влияние упругих деформаций. Эффект уширения профиля. Эффект занижения высот. Проминание при сканировании выпуклого и наклонного участков. Предел разрешения, обусловленного упругими деформациями, для различных материалов. Влияние радиуса закругления зонда и угла раствора конуса. Конволюция формы зонда с рельефом поверхности. Латеральная разрешающая способность АСМ. Артефакты, обусловленные пространственным разрешением. Атомарное и псевдоатомарное разрешение.

#### Лекция 7: Калибровка АСМ для корректного измерения рельефа поверхности

Линейные меры для растровых электронных и атомно-силовых микроскопов. Периодические, шаговые и одиночные структуры. Свойства универсальной линейной рельефной меры. Рельефная шаговая структура с трапециевидным профилем и большим наклоном боковых стенок МШПС-2.0К. Создание структуры с трапециевидным профилем. Калибровка АСМ с использованием меры МШПС-2.0К и других тестовых структур.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в изучении принципов функционирования сканирующего зондового микроскопа NTegra (НТ-МДТ, Россия). В ходе работы слушатель знакомится:

- 1) с основными узлами микроскопа,
  - 2) с управляющей программой микроскопа,
- и обучается:
- 3) установке зондовых датчиков,
  - 4) юстировке оптической системы регистрации,
  - 5) подготовке образцов,
  - 6) ручному и автоматическому подводу образца,
  - 7) принципам работы контактным квазистатическим методом и бесконтактным колебательным методом,
  - 8) определять абсолютные значения силы взаимодействия зонда с образцом в контактном методе и амплитуды колебаний в бесконтактном методе,
  - 9) калибровке АСМ для корректного измерения рельефа поверхности.

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

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 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 к курсу

#### **«Измерение рельефа поверхности с помощью атомно-силового микроскопа»**

##### Лекция 1: Физические принципы работы АСМ. Часть 1: Силовое взаимодействие зонда с поверхностью. Потенциал взаимодействия зонда с образцом. Режимы работы АСМ

1.1. Потенциал Леннарда-Джонса включает в себя потенциалы сил:

- А) упругого взаимодействия и капиллярной;  
Б) капиллярной и адгезионной;  
В) адгезионной и Ван-дер-Ваальса;  
Г) упругого взаимодействия и Ван-дер-Ваальса.

1.2. Давление в пределах контакта зонда из кремния (модуль упругости  $E = 150$  ГПа) с поверхностью образца при прочих равных параметрах наибольшее в случае, когда образец:

- А) стекло ( $E = 0.65$  ГПа);  
Б) вольфрам ( $E = 400$  ГПа);  
В) Алмаз ( $E = 1000$  ГПа);  
Г) медь ( $E = 120$  ГПа).

1.3. Зависимость силы Ван-дер-Ваальса  $F$  между зондом и полубесконечной поверхностью образца от расстояния зонд-образец  $h$  подчиняется закону  $F \propto \frac{1}{h^2}$  в случае,

если форму зонда приближают:

- А) параболоидом или сферой;  
Б) конусом;  
В) усеченным конусом;  
Г) пирамидой.

1.4. Для описания адгезии твердых тел между поверхностью образца и зондом малого радиуса закругления и большой жесткости используют модель

- А) Герца;  
Б) DMT;  
В) JKR;  
Г) Маугиса.

1.5. Дисперсионное взаимодействие возникает между:

- А) неполярными молекулами;  
Б) полярной и неполярной молекулами;  
В) полярными молекулами;  
Г) молекулами любой полярности.

##### Лекция 2: Физические принципы работы АСМ. Часть 2: Линейные колебания кантилевера

2.1. Колебания кантилевера при наличии сил трения являются периодическими в случае, когда коэффициент затухания  $\delta$

- А) больше собственной частоты  $\omega_0$ ;                      Б) меньше собственной частоты  $\omega_0$ ;  
 В) равен собственной частоте  $\omega_0$ ;                      Г)  $\delta \rightarrow \infty$ .

2.2. В случае вынужденных колебаний кантилевера при наличии трения резонансная частота колебаний  $\Omega_R$ :

- А) больше собственной частоты  $\omega_0$ ;                      Б) меньше собственной частоты  $\omega_0$ ;  
 В) равна собственной частоте  $\omega_0$ ;                      Г)  $\Omega_R \rightarrow \infty$ .

2.3. В случае вынужденных колебаний при наличии трения ширина резонансной кривой  $\Delta\Omega$  равна ( $\omega_0$  - собственная частота,  $Q$  - добротность):

- А)  $\Delta\Omega = \omega_0/Q$ ;                                              Б)  $\Delta\Omega = Q/\omega_0$ ;  
 В)  $\Delta\Omega = \omega_0/Q^2$ ;                                          Г)  $\Delta\Omega = 0$ .

2.4. В случае малых колебаний кантилевера в силовом поле при  $F'_{ts} < 0$  фазо-частотная характеристика:

- А) растягивается вдоль оси фазы;                      Б) сжимается вдоль оси фазы;  
 В) сдвигается влево по оси частоты;                      Г) сдвигается вправо по оси частоты.

2.5. В случае малых колебаний кантилевера в силовом поле при  $F'_{ts} < 0$  амплитуда колебаний на резонансной частоте  $A_R$ :

- А) не изменяется;                                              Б) увеличивается;  
 В) уменьшается;                                              Г)  $A_R \rightarrow \infty$ .

### Лекция 3: Устройство АСМ

3.1. Типичный радиус закругления коммерческого зонда составляет

- А) 100 нм;                                                              Б) 10 нм;  
 В) 1 нм;                                                              Г) на острие находится один атом, который участвует в силовом взаимодействии.

3.2. При вертикальном отклонении кантилевера изменяется сигнал

- А) DFL;                                                              Б) LF;  
 В) LASER;                                                              Г) все вышеперечисленные.

3.3. За что отвечает интегральная компонента в системе обратной связи?

- А) Обеспечивает отклик системы на резкие изменения (скачки) рельефа;                      Б) Обеспечивает обработку крупных деталей рельефа;  
 В) Обеспечивает обработку мелких шероховатостей поверхности;                      Г) Среди ответов А, Б и В нет правильного.

3.4. Медленный дрейф сканера в направлении последних предшествующих перемещений

является проявлением следующего недостатка пьезокерамики:

- А) нелинейность;
- Б) гистерезис;
- В) ползучесть;
- Г) температурный дрейф.

3.5. Размер пятна луча лазера на обратной стороне кантилевера в районе острия составляет около

- А) 0,5 мкм;
- Б) 5 мкм;
- В) 50 мкм;
- Г) 500 мкм.

Лекция 4: Измерительные методики. Измерение рельефа поверхности с использованием контактного квазистатического метода

4.1. Контактные методы АСМ:

- А) позволяют сканировать с большей, по сравнению с резонансными методами, скоростью;
- Б) неизбежно повреждают образец;
- В) основаны на регистрации сил отталкивания;
- Г) основаны на существовании прямого электрического контакта между острием зонда и образцом.

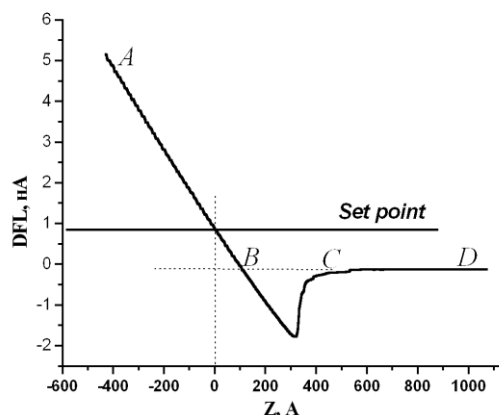
4.2. Какие свойства поверхности позволяет изучать метод латеральных сил?

- А) Распределение локальной проводимости;
- Б) Распределение поверхностного потенциала;
- В) Локальные упругие свойства поверхности;
- Г) Распределение сил трения.

4.3. В качестве входного сигнала цепи обратной связи в методе постоянной силы используется сигнал:

- А) DFL;
- Б) LF;
- В) LASER;
- Г) любой из вышеперечисленных.

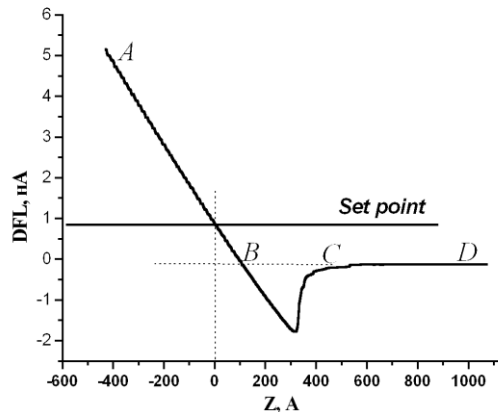
4.4. На зависимости сигнала DFL от смещения кантилевера вдоль оси Z участок AB обусловлен:



- А) Положением равновесия кантилевера (внешние силы отсутствуют) ;  
 В) действием сил Ван-дер-Ваальса;

- Б) действием капиллярных сил;  
 Г) действием упругих сил.

4.5. Абсолютное значение силы, с которой образец действует на зонд, определяется выражением ( $k$  – коэффициент жесткости кантилевера,  $\beta$  – коэффициент наклона прямой  $AB$ ):



- А)  $F = \frac{\beta}{k} DFL$  ;  
 В)  $F = k\beta DFL$  ;

- Б)  $F = \frac{k}{\beta} DFL$  ;  
 Г)  $F = \frac{\beta}{k} DFL^2$  .

Лекция 5: Измерение рельефа поверхности с использованием бесконтактного колебательного метода

5.1. Сигнал MAG это

- А) сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний сигнала DFL;  
 В) сигнал, снимаемый с выхода синхронного детектора;

- Б) сигнал, пропорциональный расстоянию зонд-поверхность;  
 Г) ) сигнал, снимаемый с выхода оптической системы регистрации отклонения кантилевера.

5.2. Возбуждение колебаний кантилевера в полуконтактном методе осуществляется с помощью:

- А) пьезосканера;  
 В) пьезотрубки;

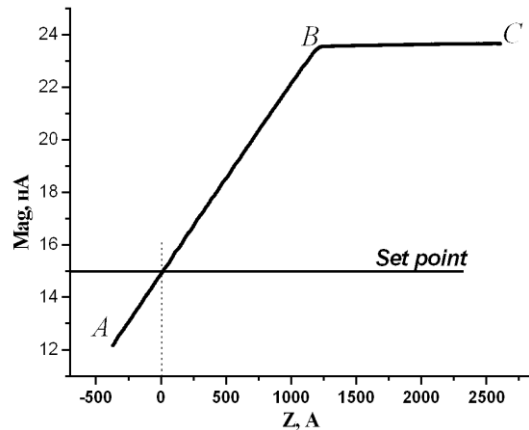
- Б) пьезодрайвера;  
 Г) переменным электрическим напряжением, приложенным между зондом и образцом.

5.3. В качестве входного сигнала цепи обратной связи в полуконтактном методе рекомендуется использовать сигнал

- А) MAG;  
 В) RMS;

- Б) MAGsin или MAGcos;  
 Г) Phase.

5.4. На зависимости сигнала MAG от смещения кантилевера вдоль оси Z участок AB:



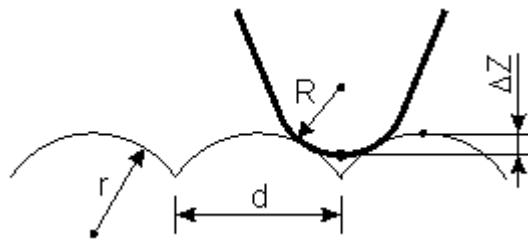
- А) обусловлен электростатическими силами;  
 Б) обусловлен силами Ван-дер-Ваальса;  
 В) соответствует касанию кантилевером поверхности;  
 Г) соответствует свободным колебаниям кантилевера.

5.5. Абсолютное значение рабочей амплитуды колебаний, соответствующей Set point, составляет примерно:

- А) 9 нм;  
 Б) 90 нм;  
 В) 250 нм;  
 Г) 2500 нм.

### Лекция 6: Предельное разрешение АСМ

6.1. Минимальное расстояние между разрешаемыми поверхностными особенностями, при котором «провал» между ними на АСМ изображении еще может быть детектирован (т.е. когда он равен пределу  $\Delta Z$ , определяется выражением:



- А)  $d \approx \sqrt{8(R+r)\Delta Z}$ ;  
 Б)  $d \approx \sqrt{8(R-r)\Delta Z}$ ;  
 В)  $d \approx \sqrt{2(R+r)\Delta Z}$ ;  
 Г)  $d \approx \sqrt{2(R-r)\Delta Z}$ .

Ответ: А

6.2. Упругие деформации заведомо не приводят к:

- А) артефактам;  
 Б) разрушению материала зонда и/или образца;  
 В) эффекту уширения профиля;  
 Г) эффекту занижения высот.

6.3. Предел продольного разрешения, обусловленный упругими деформациями, в случае



взаимодействия Si зонда ( $E = 150 \text{ ГПа}$ ,  $R = 10 \text{ нм}$ ) с плоской поверхностью меди ( $E = 120 \text{ ГПа}$ ) с силой  $100 \text{ нН}$  равен:

- А)  $0.15 \text{ нм}$ ;
- Б)  $1 \text{ нм}$ ;
- В)  $1.5 \text{ нм}$ ;
- Г)  $10 \text{ нм}$ .

6.4. Какое увеличение возможно получить с помощью АСМ?

- А)  $10000$  раз;
- Б)  $100$  раз;
- В) Сколь угодно большое;
- Г) Понятие увеличения не вполне корректно.

6.5. Какие параметры кантилевера не влияют на величину предельного пространственного разрешения в АСМ?

- А) Радиус острия зонда;
- Б) Жесткость кантилевера;
- В) Аспектное соотношение (отношение длины зонда к толщине его основания);
- Г) Модуль упругости материала зонда.

### Лекция 7: Калибровка АСМ для корректного измерения рельефа поверхности

7.1. Аттестация шаговых структур рельефных мер производится:

- А) растровым электронным микроскопом;
- Б) просвечивающим электронным микроскопом;
- В) методом рентгеновской дифракции;
- Г) интерферометрическим методом.

7.2. Свойство, которым не обязана обладать рельефная структура для того, чтобы она могла стать универсальной линейной мерой для калибровки АСМ, работающих в микрометровом и нанометровом диапазонах:

- А) Аттестация шага должна проводиться на максимальной площади;
- Б) Структура должна давать возможность определить нелинейность сканирования АСМ, неортогональность Z-сканера и эффективный радиус острия зонда;
- В) Конструкция структуры должна обеспечивать большой срок службы;
- Г) Аттестация шага структуры должна осуществляться с помощью интерференции оптического излучения.

7.3. Определяющим параметром трапецевидной рельефной меры, через который определяются масштабный коэффициент видеоизображения и эффективный радиус зонда, является?

- А) Высота выступа;
- Б) Ширина выступа;
- В) Проекция наклонной стенки выступа;
- Г) Период между выступами.

7.4. Абсолютная погрешность при калибровке X, Y сканеров с помощью решеток TGZ, обусловленная неточностью геометрических параметров, составляет:

- А)  $5 \text{ нм}$ ;
- Б)  $10 \text{ нм}$ ;
- В)  $50 \text{ нм}$ ;
- Г)  $100 \text{ нм}$ .



19. . Вычислите рабочую силу придавливания в контактном методе для случая на рис. 4.5, если жесткость кантилевера составляет 5 Н/м.
20. Перечислите достоинства и недостатки:
  - а) метода постоянной высоты,
  - б) метода постоянной силы.
21. Поясните, как работает цепь обратной связи в контактном методе.
22. Вычислите значение капиллярной силы в контактном методе для случая на рис. 4.5, если жесткость кантилевера составляет 5 Н/м.
23. Нарисовать структуру цепи обратной связи в полуконтактном методе (постоянная амплитуда). Как можно работать в методе постоянной высоты?
24. Вычислите рабочую амплитуду колебаний в полуконтактном методе для случая на рис. 5.2.
25. Вычислите свободную амплитуду колебаний для случая на рис. 5.2.
26. Как будет выглядеть зависимость  $MAG(z)$ , если между зондом и образцом действуют электростатические силы?
27. Поясните, как работает цепь обратной связи в полуконтактном методе.
28. Поясните, как работает цепь обратной связи в полуконтактном методе.
29. Перечислите достоинства и недостатки полуконтактного метода по сравнению с контактными.
30. Поясните, как работает цепь обратной связи в полуконтактном методе.
31. Каким образом формируются сигналы  $MAG$ ,  $MAG_{sin}$ ,  $MAG_{cos}$ ?
32. Объяснить назначение и принцип работы синхронного детектора (усилителя). Для сигнала  $f(t) = A + B\sin(\omega_1 t + \varphi) + C\cos(\omega_2 t + \varphi)$  вычислить:

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**  
**«Измерение рельефа поверхности с помощью атомно-силового микроскопа»**

1. История развития атомно-силовой микроскопии
2. Анализ научной литературы: физическая природа капиллярных сил между зондом и поверхностью образца.
3. Природа трения на микро- и наномасштабе.
4. Пьезосканеры, их недостатки и способы борьбы с ними
5. Современные зонды атомно-силового микроскопа: достижения мировых производителей
6. Атомное и псевдоатомное разрешение в АСМ
7. Обзор современных атомно-силовых микроскопов и их основных параметров
8. Обзор научной литературы: модификация рельефа и электрофизических свойств поверхности с помощью АСМ.
9. Обзор научной литературы: АСМ исследования в области микро- и нанoeлектроники
10. Обзор научной литературы: АСМ исследования в области биологии

**Учебно-тематический план**

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на	Очный практикум или другое практическое задание	

			общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	контрольные вопросы		
	«Измерение рельефа поверхности с помощью атомно-силового микроскопа»	24 ч.	10 ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)
1.	Лекция 1: Физические принципы работы АСМ. Часть 1: Силовое взаимодействие зонда с поверхностью Потенциал взаимодействия зонда с образцом. Режимы работы АСМ.		2 ч.	0,5 ч.		Реферат
2.	Лекция 2: Физические принципы работы АСМ. Часть 2: Линейные колебания кантилевера.		2 ч.	0,25 ч.		
3.	Лекция 3: Устройство АСМ		2 ч.	0,25 ч.		
4.	Лекция 4: Измерительные методики. Измерение рельефа поверхности с использованием контактного квазистатического метода.		1 ч.	0,25 ч.		
5.	Лекция 5: Измерение рельефа поверхности с использованием полуконтактного колебательного метода.		1 ч.	0,25 ч.		
6.	Лекция 6: Предельное разрешение АСМ.		1 ч.	0,25 ч.		
7.	Лекция 7: Калибровка АСМ для корректного измерения рельефа поверхности.		1 ч.	0,25 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.).**

**Список литературы и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 25.**

1. Справочное руководство «Проведение измерений (подготовка прибора, основные методы измерений)» для сканирующего зондового микроскопа NTegra производства NT-MDT.
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 246 с

3. Галлямов М.О., Яминский И.В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов.
4. Сивухин Д.В. Курс общей физики: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1983. – 551 с.
5. Israelachvili J.N. Intermolecular and Surface Forces. – Academic Press, 1998. – 450 с
6. Сивухин Д.В. Курс общей физики: Электричество. – М.: Наука, 1983. – 687 с.
7. Ландау Л.Д. Квантовая механика: Нерелятивистская теория. – М.: Наука, 1989. – 767 с.
8. Рубин А.Б. Биофизика: Теоретическая биофизика. - М.: Книжный дом Университет, 1999. – 448 с.
9. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
10. Derjaguin B.V., Muller V.M., Todorov Yu.P., J. Colloid. Interface Sci. 53, 314 (1975).
11. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985.
12. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1987.
13. Maugis D.J., Colloid J. Interface Sci, 150 (1992) p. 243.
14. С.Э. Хайкин. Механика. – М.: ОГИЗ, 1947. – 574 с.
15. Д. В. Сивухин. Механика. – М.: Наука, 1989. – 576. с.
16. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496 с.
17. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия (об-зор) // ПТЭ. 1989. — №5. — С. 25.
18. Быков В.А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования модификации поверхно-стей. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М., 2000. — С. 285.
19. Бухараев А.А., Овчинников Д.В., Бухараева А.А. Диагности-ка поверхности с помощью сканирующей силовой микро-скопии (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика ма-териалов. 1997. — Т. 63. — №5. — С. 10.
20. Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Раков А. В., Тодуа П. А. «Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазона для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии» // Труды Института Общей Физики им. А. М. Прохорова, 62 (2006) С. 36.
21. Nakayama Y., Okazaki S., Sugimoto A. “Proposal for a new submicron dimension reference for an electron beam metrology system” // J. Vac. Sci. Technol. B6 (1988) P. 1930-1933.
22. Postek M. T., Vldar A. E. “Critical Dimension Metrology and the Scanning Electron Microscope” // Handbook of Silicon Semiconductor Metrology. Ed. A.C. Diebold. N.Y.-Basel: Macel Dekker. P. 295-333
23. Bosse H., Mirande W., Frace C. G., Bruck H.-J., Lehnigk S. “Comparison of linewidth measurements on COG mask” // 17 Europ. Mask Conf. on Mask Technology for Integrated Circuits and Micro-Components (EMC-2000). Munich, 2000. P. 111-119.
24. Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В. «Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах» // Микроэлектроника. 31 (2002), № 4. С. 243-262.
25. Новиков Ю. А., Раков А. В., Стеколин И. Ю. «Калибровка РЭМ с помощью шаговых структур» // Измерительная техника. № 2 (1995) С. 64-66.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части  
учебного курса на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru)**