

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Уральский государственный университет им. А.М. Горького»

ИОНЦ «Нанотехнологии и перспективные материалы»

Физический факультет

Кафедра компьютерной физики

Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии

Программа дисциплины

Шишкин Е.И.
Николаева Е.В.

Подпись руководителя ИОНЦ
Дата

Екатеринбург
2008

Программа специальной дисциплины «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» составлена в соответствии с требованиями регионального компонента к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки бакалавров по направлению 210600 «Нанотехнология» по циклу «Специальные дисциплины и/или дисциплины специализации» государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования.

Курс «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» рассчитан на студентов 3-го курса, обучающихся на физическом и химическом факультетах Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Семестры: 5-6 ой.

Общая трудоемкость дисциплины (ч): 50.

В том числе:

лекции: 21;

семинары: 3;

лабораторный практикум: 12;

самостоятельная работа: 14.

Составители:

Е.И. Шишкин, кандидат физ.-мат. наук (кафедра компьютерной физики, физический факультет УрГУ);

Е.В. Николаева, кандидат физ.-мат. наук (Уральский центр коллективного пользования «Сканирующая зондовая микроскопия» УрГУ).

При подготовке данного пособия были использованы материалы компании НТ-МДТ, материалы использованы с разрешения правообладателя.

© Уральский государственный университет, 2008

© Шишкин Е. И., Николаева Е. В., составление, 2008

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью специальной дисциплины «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» является теоретическое и практическое ознакомление студентов с одним из наиболее мощных и универсальных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердых тел с нанометровым пространственным разрешением. С развитием методологии сканирующей зондовой микроскопии неразрывно связаны современные достижения в области создания и исследования наноматериалов, а сама методика приобрела статус одной из базовых в современном материаловедении, что обуславливает актуальность ее изучения студентами естественнонаучных специальностей.

Задачи дисциплины:

- ознакомление с устройством и общими принципами работы сканирующего зондового микроскопа;
- изучение физических явлений, лежащих в основе работы сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов;
- обзор методик сканирующей зондовой микроскопии, позволяющих исследовать локальные свойства поверхности твердых тел с высоким пространственным разрешением;
- приобретение практических навыков использования сканирующей зондовой микроскопии для исследования наноматериалов с нанометровым пространственным разрешением;
- знакомство с методами математической обработки и количественного анализа изображений, получаемых с помощью сканирующей зондовой микроскопии.

Место дисциплины в системе высшего профессионального образования

Для успешного усвоения материала дисциплины «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» необходимо знание общих курсов Физики из цикла общих математических и естественнонаучных дисциплин. В свою очередь, знание спецкурса «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» может быть рекомендовано для последующего успешного изучения курсов «Введение в нанотехнологии» и «Физико-химия наноструктурированных материалов». Изучение дисциплины также рекомендовано студентам, планирующим использовать методы сканирующей зондовой микроскопии при выполнении курсовых и дипломных работ.

Требования к уровню освоения содержания курса

В результате изучения дисциплины студенты должны иметь четкое представление об общих принципах работы сканирующих зондовых микроскопов; понимать суть физических явлений, лежащих в основе работы сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов; знать основные методики сканирующей зондовой микроскопии, позволяющие ис-

следовать механические, магнитные и электрические свойства поверхности твердых тел с нанометровым пространственным разрешением; иметь базовые практические навыки проведения измерений наноматериалов на сканирующем зондовом микроскопе.

Методическая новизна курса

В рамках данного курса впервые достаточно подробно будет рассмотрено устройство и принцип работы сканирующих зондовых микроскопов, в том числе будут изучены базовые физические явления, лежащие в основе различных методик измерений, представлены примеры использования сканирующей зондовой микроскопии для исследования различных наноматериалов. В ходе освоения курса студенты получают реальные практические навыки работы на учебных сканирующих зондовых микроскопах и проведут измерения различных материалов с нанометровым пространственным разрешением. Особое внимание будет уделено теоретическому и практическому освоению методов математической обработки и количественного анализа изображений сканирующей зондовой микроскопии. В ходе изучения курса будет проведено несколько семинаров, на которых студенты получают возможность сделать доклады по использованию сканирующей зондовой микроскопии для исследования новых перспективных наноматериалов, основываясь на статьях ведущих мировых научных изданий и интернет-публикациях.

II. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

РАЗДЕЛЫ КУРСА, ТЕМЫ, ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Введение

Краткий обзор содержания курса. Введение и терминология. Наноматериалы. История развития сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Общие устройство и принципы работы СЗМ: зондовые датчики, сканирующие элементы, типы взаимодействий, роль обратной связи. Классификация методов СЗМ. Обзор русскоязычной учебно-научной литературы по СЗМ.

Тема 2. Сканирующие элементы зондовых микроскопов

Типы сканеров, применяемых в СЗМ, основные свойства пьезокерамических материалов, лежащие в основе их изготовления. Устройство триподных, трубчатых, биморфных и гибридных сканеров.

Устройства для грубого подвода и перемещения зонда относительно исследуемой поверхности: редукторы перемещений, шаговые электро- и пьезодвигатели.

Защита СЗМ от механических вибраций. Пассивные и активные виброизолирующие системы. Защита от акустических шумов. Стабилизация термодрейфа положения зонда над по-

верхностью.

Тема 3. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия

Физические основы работы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Функция состояния системы, уравнение Шредингера. Туннельный эффект. Туннельный эффект в квазиклассическом приближении. Зонная структура металлов, энергетическое распределение электронов в металле. Туннельный ток в системах металл-диэлектрик-металл и металл-диэлектрик-полупроводник.

Устройство и принцип работы СТМ: туннельный сенсор, требования и методы изготовления туннельных зондов, режимы постоянного тока и постоянной высоты. Ограничения СТМ. Реализация атомарного разрешения в сканирующем туннельном микроскопе.

"Наблюдаемые" физические величины в СТМ. Измерение характеристики тока-расстояние и локальной работы выхода. СТМ спектроскопия: измерение вольт-амперных характеристик туннельного контакта и распределения плотности электронных состояний.

Примеры использования СТМ для исследования наноматериалов.

Тема 4. Атомно-силовая микроскопия

4.1. Зондовые датчики для атомно-силовой микроскопии

Основные типы кантилеверов – зондовых датчиков, используемых в атомно-силовой микроскопии (АСМ). Технология изготовления кантилеверов. Потенциал взаимодействия зонда с образцом, зависимость силы взаимодействия от расстояния между зондом и образцом. Режимы работы АСМ: контактная АСМ, бесконтактная и полуконтактная АСМ.

Особенности силового взаимодействия кантилеверов с поверхностью: упругие взаимодействия (задача Герца), капиллярные силы, сила Ван-дер-Ваальса, адгезионные силы, электростатическое и магнитное взаимодействие. Закон Гука и отклонения кантилевера под действием вертикальной (нормальной), продольной и поперечной сил. Тензор обратной жесткости кантилевера. Эффективная масса и собственная частота механических колебаний кантилевера.

4.2. Контактная атомно-силовая микроскопия

Устройство и принцип работы СЗМ в контактном режиме АСМ, оптический силовой сенсор. Режимы постоянной высоты и постоянной силы, назначение и принципы работы обратной связи. Предельное разрешение в контактном режиме. Недостатки контактной АСМ.

Исследование механических свойств материалов с помощью контактной АСМ. Микроскопия сил трения: регистрация латеральных силы взаимодействия зонда и образца, вклады топографии и неоднородности коэффициента трения. Качественная интерпретация результатов микроскопии сил трения.

Модуляционные методики на базе контактной АСМ. Микроскопия модуляции силы и

атомно-силовая акустическая микроскопия: измерение пространственного распределения микротвердости, упругих констант, адгезионных свойств.

4.3. Бесконтактная и полуконтактная методики атомно-силовой микроскопии

Теория колебаний кантилевера: свободные и вынужденные, линейные и нелинейные колебания кантилевера, моды колебаний. Зависимость амплитуды и фазы вынужденных колебаний кантилевера от расстояния между зондом и образцом. Бесконтактный режим колебаний кантилевера. Полуконтактный режим колебаний кантилевера.

Устройство и принцип работы СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах АСМ. Методы введения обратной связи для контроля расстояния между зондом и образцом. Метод отображения фазы. Преимущества бесконтактной и полуконтактной АСМ. Стратегия выбора оптимальных параметров колебаний кантилевера и режима сканирования при исследовании различного типа объектов.

Примеры использования бесконтактной и полуконтактной АСМ для исследования наноматериалов.

Тема 5. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии

Параметры, влияющие на качество и пространственное разрешение изображений, получаемых с помощью СЗМ. Источники искажений и артефактов в СЗМ измерениях.

Искажения, обусловленные несовершенством сканирующих элементов СЗМ: нелинейность, крип, гистерезис пьезокерамики. Программные и аппаратные методы компенсации недостатков сканирующих элементов, устройство сканеров с линеаризующими элементами.

Влияние формы зондов на качество СЗМ изображений, эффект конволюции. Методы диагностики наличия искажений, обусловленных несовершенной формой зонда, методы определения формы зонда и деконволюции результатов измерений.

Тема 6. Магнитная силовая микроскопия

Исследование магнитных свойств материалов методом магнитной силовой микроскопии (МСМ): принцип работы СЗМ в режиме МСМ, требования к зондовым датчикам, особенности взаимодействия зонда с магнитным полем образца, проблема топографических артефактов и качество получаемых изображений. Возможные варианты реализации двухпроходных магнитных методик. Квазистатические методики МСМ. Колебательные методики МСМ.

Примеры исследования магнитных наночастиц методом МСМ.

Тема 7. Электрические методики сканирующей зондовой микроскопии

7.1. Контактные электрические методики сканирующей зондовой микроскопии

Исследование электрических свойств материалов с помощью СЗМ. Зондовые датчики для электрических методик измерения. Электромеханическое взаимодействие между кантилевером и образцом в контактном режиме. Сканирующая микроскопия сопротивления расте-

кания. Контактная сканирующая емкостная микроскопия. Силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика. Сканирующая микроскопия нелинейной диэлектрической проницаемости. Факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в контактных электрических методиках СЗМ.

Примеры СЗМ исследований кинетики нанодоменов в сегнетоэлектриках.

7.2. Двухпроходные электрические методики сканирующей зондовой микроскопии

Реализация электрических двухпроходных методик СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах. Особенности вынужденных колебаний кантилевера при электростатическом взаимодействии зонда с поверхностью при приложении постоянного и переменного электрического напряжения между зондом и образцом. Электрическая силовая микроскопия. Микроскопия поверхностного потенциала (метод зонда Кельвина). Сканирующая емкостная микроскопия. Особенности подбора параметров измерения на первом и втором проходах сканирования в различных методиках. Факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в двухпроходных электрических методиках СЗМ.

Тема 8. Оптические методики сканирующей зондовой микроскопии

8.1. Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия

Преимущества методов оптической микроскопии при исследовании материалов. Дифракционный предел пространственного разрешения классической оптической микроскопии. Идея конфокальной оптической микроскопии, повышение пространственного разрешения. Устройство и принцип работы сканирующего лазерного конфокального микроскопа, трехмерное сканирование, горизонтальное и вертикальное разрешение методики в сравнении с классической оптической микроскопией. Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния: физические основы, техническая реализация и аналитические возможности.

8.2. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия

Области ближнего и дальнего поля при прохождении света через субволновую диафрагму, преодоление оптического дифракционного предела, идея сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. Устройство, принцип действия, типы используемых зондов и основные режимы работы сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. Методика регистрации резонанса поперечных сил для контроля расстояния между зондом и поверхностью, реализация системы обратной связи и регистрации топографии поверхности. Безапертурная сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия. Эффект гигантского усиления сигнала комбинационного рассеяния вблизи острия проводящего зонда.

Тема 9. Сканирующая зондовая литография

Физические основы зондовой литографии в различных режимах СЗМ: СТМ литография,

АСМ силовая литография, анодно-окислительная литография, локальное переключение поляризации в сегнетоэлектриках, литография с помощью зонда сканирующего ближнепольного оптического микроскопа, наноманипуляции отдельными атомами и молекулами. Векторная и растровая зондовая литографии.

Примеры нанолитографии в различных средах с использованием СЗМ.

Тема 10. Анализ результатов сканирующей зондовой микроскопии

Основные типы данных, получаемых при СЗМ измерениях: спектроскопические кривые, изображения, многослойные изображения, параметрические изображения. Варианты визуализации СЗМ изображений: двухмерное и трехмерное представление, проведение сечений. Методы коррекции изображений на примере обработки результатов измерения топографии поверхности. Вычитание систематических составляющих: постоянная компонента (общее смещение), постоянный наклон, поверхности высших порядков, соответствующие неидеальной траектории движения сканера. Методы фильтрации СЗМ изображений.

Количественный анализ СЗМ изображений. Использование преобразования Фурье и функции автокорреляции для определения геометрических характеристик периодических и квазирегулярных структур. Проведение статистического анализа СЗМ изображений: определение шероховатости, статистика зерен, фрактальный анализ.

ТЕМЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Исследование углеродных наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии.
2. Исследование биологических объектов методами сканирующей зондовой микроскопии.
3. Проведение наноманипуляций с помощью сканирующей зондовой микроскопии.

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Лабораторная работа №1. Сканирующая туннельная микроскопия.

Лабораторная работа №2. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия.

Лабораторная работа №3. Силовая нанолитография.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Расскажите общее устройство и принципы работы, присущие любому СЗМ.
2. Каковы основные типы сканеров, применяемых в СЗМ?
3. Какое основное физическое явление лежит в основе СТМ?
4. Каким образом реализуется режим постоянной высоты СТМ?

5. Каким образом реализуется режим постоянного тока СТМ?
6. Какие ограничения на свойства исследуемых материалов накладывает СТМ?
7. Каким образом реализуется режим сканирующей туннельной спектроскопии?
8. Приведите примеры использования СТМ при исследовании наноматериалов.
9. Изобразите силовую кривую, характеризующую взаимодействие между зондом и поверхностью. Какие участки кривой каким основным режимам АСМ соответствуют?
10. Каким образом реализуется режим постоянной высоты в контактной АСМ?
11. Каким образом реализуется режим постоянной силы в контактной АСМ?
12. Какие деформации кантилевера регистрируются в режиме микроскопии сил трения?
13. Какие свойства поверхности могут быть измерены с помощью микроскопии модуляции силы и атомно-силовой акустической микроскопии?
14. Изобразите зависимость амплитуды и фазы вынужденных колебаний кантилевера от расстояния между зондом и поверхностью. Каким образом можно определить расстояния, на которых реализуется режим притяжения и режим отталкивания между зондом и поверхностью?
15. Каким образом реализуется режим отображения фазы в бесконтактной или полуконтактной АСМ? Какие дополнительные свойства материалов могут быть исследованы в этом режиме?
16. Какие основные типы артефактов могут наблюдаться на изображениях СЗМ?
17. В чем сущность двухпроходных методик СЗМ?
18. Какие измеряемые физические величины могут быть использованы в МСМ для получения магнитного контраста на изображениях?
19. Какие типы электромеханического взаимодействия возможны между кантилевером и образцом в контактном режиме?
20. Приведите несколько вариантов реализации двухпроходных методик СЗМ для измерения электрических свойств материалов.
21. Какие ограничения накладывает дифракционный предел на пространственное разрешение классической оптической микроскопии?
22. Какое конструктивное решение реализовано в конфокальной оптической микроскопии для повышения пространственного разрешения?
23. Какие дополнительные возможности дает сканирующая лазерная конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния?
24. В чем заключается основная идея реализации сканирующей ближнепольной оптической микроскопии, обеспечивающая многократное увеличение разрешающей способности методики?

25. В чем заключается эффект гигантского усиления сигнала комбинационного рассеяния вблизи острия проводящего зонда?

26. Какие основные типы воздействий зонда на поверхность образца используются в режимах сканирующей зондовой литографии?

27. Какие существуют варианты визуализации изображений СЗМ?

28. Какие методы математической обработки могут быть использованы для коррекции изображений СЗМ?

29. Какие существуют методы статистического анализа изображений СЗМ? Какие объекты являются предметом анализа?

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЗАЧЕТУ

1. Общее устройство и принципы работы СЗМ: зондовые датчики, сканирующие элементы, типы взаимодействия, роль обратной связи.

2. Основные типы сканирующих элементов и механизмов подвода и перемещения зонда относительно поверхности образца. Методы защиты СЗМ от механических вибраций, акустического воздействия и термических дрейфов.

3. Физические основы СТМ. Туннельный эффект в квази-классическом приближении. Туннельный ток в системах металл-диэлектрик-металл и металл-диэлектрик-полупроводник. Ограничения СТМ.

4. Устройство и принцип работы СТМ. Режимы постоянного тока и постоянной высоты, реализация атомарного разрешения, методы изготовления зондов.

5. Сканирующая туннельная спектроскопия и другие методики измерений, основанные на СТМ: измерение локальной работы выхода и распределения плотности электронных состояний, измерение кривых подвода и оценка качества зондов.

6. Кантилеверы – зондовые датчики для АСМ: основные типы, технология изготовления, геометрические и механические свойства.

7. Потенциал взаимодействия зонда с образцом в АСМ. Зависимость силы взаимодействия от расстояния между зондом и образцом – контактный, полуконтактный и бесконтактный режимы АСМ.

8. Устройство и принцип работы СЗМ в режиме контактной АСМ. Режимы постоянной высоты и постоянной силы, реализация атомарного разрешения. Ограничения методики контактной АСМ.

9. Исследование механических свойств материалов с помощью контактной АСМ. Микроскопия сил трения. Микроскопия модуляции силы. Атомно-силовая акустическая микроскопия.

10. Теория механических колебаний кантилевера. Зависимость амплитуды и фазы вынужденных колебаний кантилевера от расстояния между зондом и образцом. Бесконтактный и полуконтактный режимы колебаний кантилевера.

11. Устройство и принцип работы СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах АСМ. Метод отображения фазы. Преимущества и недостатки бесконтактной и полуконтактной методик по сравнению с контактной АСМ.

12. Параметры, влияющие на качество и пространственное разрешение изображений, получаемых с помощью СЗМ, источники искажений и артефактов. Искажения, обусловленные несовершенством сканирующих элементов, и методы их компенсации. Влияние формы зондов на качество изображений, эффект конволюции.

13. Исследование магнитных свойств материалов методом МСМ. Особенности взаимодействия зонда, имеющего магнитное покрытие, с магнитным полем образца, проблема топографических артефактов и качество получаемых изображений.

14. Реализация двухпроходных магнитных методик. Квазистатические и колебательные методики магнитной силовой микроскопии.

15. Исследование электрических свойств материалов с помощью СЗМ. Зондовые датчики для электрических методик измерения. Электромеханическое взаимодействие между кантилевером и образцом в контактном режиме. Факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в контактных электрических методиках.

16. Контактные электрические методики СЗМ: сканирующая микроскопия сопротивления растекания и контактная сканирующая емкостная микроскопия. Основные принципы реализации, измеряемые величины, примеры использования.

17. Контактные электрические методики СЗМ: силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика и сканирующая микроскопия нелинейной диэлектрической проницаемости. Основные принципы реализации, измеряемые величины, примеры использования.

18. Реализация электрических двухпроходных методик СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах. Особенности вынужденных колебаний кантилевера при электростатическом взаимодействии зонда с поверхностью при приложении постоянного и переменного электрического напряжения между зондом и образцом. Электрическая силовая микроскопия.

19. Микроскопия поверхностного потенциала (метод зонда Кельвина). Сканирующая емкостная микроскопия. Основные принципы реализации, измеряемые величины, примеры использования.

20. Преимущества методов оптической микроскопии по сравнению с другими типами микроскопии. Дифракционный предел пространственного разрешения классической оптической микроскопии. Идея конфокальной оптической микроскопии, повышение простран-

венного разрешения.

21. Принцип действия и реализация сканирующей лазерной конфокальной микроскопии, трехмерное сканирование, горизонтальное и вертикальное разрешение методики в сравнении с классической оптической микроскопией.

22. Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния: физические основы, техническая реализация и аналитические возможности.

23. Области ближнего и дальнего поля при прохождении света через субволновую диафрагму, преодоление оптического дифракционного предела, идея сканирующего ближнепольного оптического микроскопа.

24. Устройство, принцип действия, типы используемых зондов и основные режимы работы сканирующего ближнепольного оптического микроскопа.

25. Безапертурная сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия. Эффект гигантского усиления сигнала комбинационного рассеяния вблизи острия проводящего зонда.

26. Физические основы литографии в различных режимах СЗМ. Векторная и растровая зондовая литографии.

27. Обработка результатов СЗМ. Основные типы данных, получаемых при измерениях с помощью СЗМ и варианты их представления. Методы коррекции изображений на примере обработки результатов измерения топографии поверхности.

28. Количественный анализ изображений СЗМ. Использование преобразования Фурье и функции автокорреляции для определения геометрических характеристик периодических и квазирегулярных структур. Проведение статистического анализа изображений: определение шероховатости, статистика зерен, фрактальный анализ.

III. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСОВ КУРСА ПО ТЕМАМ И ВИДАМ РАБОТ

№ п/п	Наименование разделов и тем	ВСЕГО (часов)	Аудиторные занятия (часов)			Самостоятельная работа (часов)
			Лекции	Практикумы	Семинары	
1.	Введение	1	1			
2.	Сканирующие элементы зондовых микроскопов	1	1			
3.	Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия	9	2	4		3
4.	Атомно-силовая микроскопия	4			2	2
4.1.	Зондовые датчики для атомно-силовой микроскопии	2	2			

4.2.	Контактная атомно-силовая микроскопия	2	2			
4.3.	Бесконтактная и полуконтактная методики атомно-силовой микроскопии	9	2	4		3
5.	Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии	1	1			
6.	Магнитная силовая микроскопия	1	1			
7.	Электрические методики сканирующего зондового микроскопа					
7.1.	Контактные электрические методики сканирующей зондовой микроскопии	1	1			
7.2.	Двухпроходные электрические методики сканирующей зондовой микроскопии	1	1			
8.	Оптические методики сканирующей зондовой микроскопии					
8.1.	Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия	2	2			
8.2.	Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия	2	2			
9.	Сканирующая зондовая литография	9	1	4	1	3
10.	Анализ результатов сканирующей зондовой микроскопии	5	2			3
	ИТОГО:	50	21	12	3	14

IV. ФОРМА ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ

Зачет в 5-ом или 6-ом семестре.

V. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУРСА

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005, 114 с.

2. Эдельман В. С. Сканирующая туннельная микроскопия. // Приборы и техника эксперимента, № 5, с. 25 – 49 (1989).
3. Эдельман В. С. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии. // Приборы и техника эксперимента, № 1, с. 24 – 42 (1991).
4. Рыков С. А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. СПб.: Наука, 2001, 53 с.
5. Бахтизин Р. З., Галлямов Р. Р. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии. Уфа: РИО БашГУ, 2003, 82 с.

Дополнительная

1. Биннинг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности. Нобелевские лекции по физике. // УФН, т. 154, № 2, с. 261 (1986).
2. Неволин В. К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: Учебное пособие. М.: МГИЭТ (ТУ), 1996, 91 с.
3. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров. под ред. Яминского И. В. М.: Научный мир, 1997.
4. Володин А. П. Новое в сканирующей микроскопии. // Приборы и техника эксперимента, № 6, с. 3 – 42 (1998).
5. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005.
6. Рыков С. А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур: Учеб. пособие для вузов. Общ. ред. Ильина В. И., Шика А. Я.. СПб.: Наука, 2001.
7. Туннельные явления в твердых телах. под ред. Бурнштейна Э. и Лундквиста С. М.: Мир, 1973, 422 с.
8. Бараш Ю. С. Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988, 344 с.

VI. РЕСУРСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Учебный класс «Сканирующая зондовая микроскопия» УрГУ.
2. Уральский ЦКП «Сканирующая зондовая микроскопия» УрГУ.
3. Компьютерные классы информационно-вычислительного центра УрГУ.
4. Интернет-сайт компании «НТ-МДТ»: <http://www.ntmdt.ru>
5. Интернет-сайт «Нанометр»: <http://www.nanometer.ru>
6. Интернет-сайт «Центра перспективных технологий»: <http://www.nanoscopy.net>
7. Интернет-сайт учебно-научного центра «Бионаноскопия»: <http://www.nanoscopy.org>
8. Интернет-сайт объединенной группы МГУ «Сканирующая зондовая микроскопия»: <http://www.spm.genebee.msu.ru>