

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Направление подготовки 03.03.02 Физика
Направленность (профиль)
«Фундаментальная и прикладная физика»

**Ставрополь
2026**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ.....	4
Задачи лабораторных работ:	4
Приборы и принадлежности:	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	5
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	10
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	16
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	16
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	16

Введение

Цель и задачи освоения дисциплины

Целью дисциплины «Сканирующая зондовая микроскопия» является ознакомление студентов с физическими основами и основными методиками сканирующей зондовой микроскопии и её применением в нанотехнологии и материаловедении. Задачи: ознакомление студентов с физическими принципами сканирующей зондовой микроскопии; освоение методов сканирующей зондовой микроскопии, применяемым для анализа физических свойств поверхностей и исследований наноразмерных объектов и структур; формирование у студентов практических навыков работы на сканирующем зондовом микроскопе.

В результате освоения дисциплины, обучающийся должен:

Знать физические принципы зондовой микроскопии, основы современных методов работы на зондовых микроскопах

Уметь применять методики сканирующей зондовой микроскопии для анализа свойств поверхности, применять методики туннельной и атомно-силовой микроскопии для анализа свойств различных материалов

Владеть навыками работы на сканирующем зондовом микроскопе, навыками обработки данных в сканирующей зондовой микроскопии.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Цель: получение навыков работы на учебно-исследовательском сканирующем зондовом микроскопе «Nanoeducator».

Задачи лабораторных работ:

1. изучить основы сканирующей зондовой микроскопии;
2. ознакомиться с принципом работы и устройством учебно-исследовательского СЗМ «Nanoeducator»;
3. подготовить зондовый датчик методом электрохимического травления;
4. провести сканирование образцов на СЗМ «Nanoeducator» и получить изображение;
5. оформить отчет о лабораторной работе.

Приборы и принадлежности:

СЗМ «Nanoeducator», устройство для электрохимического травления, весы аналитические, химическая посуда (стакан стеклянный на 100 мл, цилиндр мерный на 10 мл, пластиковый цилиндр мерный на 10 мл, чашка. Петри на 10-20 мл, стакан для слива), ножницы, пинцет.

Расходные материалы и объекты исследования: образцы из набора СЗМ «Nanoeducator», вольфрамовая проволока, калия гидроксид (х.ч.), дистиллированная вода.

ВВЕДЕНИЕ

Наноструктурированная поверхность и происходящие на ней явления (например, адсорбция и катализ) вызывают все возрастающий интерес исследователей, инженеров и технологов. В большинстве случаев морфология поверхности определяет эксплуатационные и физико-химические свойства материала. Так, значительное увеличение скоростей определенных химических взаимодействий на поверхности происходит в присутствии катализаторов, у которых активность непосредственно связана с морфологией поверхности и дисперсностью.

Большинство методов по исследованию морфологии поверхности на микро- и наноуровне масштаба, таких как рентгеновская и ионная дифракция, дифракция медленных электронов, электронная оже- спектроскопия позволяют получить только усредненную по поверхности образца картину расположения атомов и не дают информации о высоте и форме поверхностных структурных элементов. Более того, использование этих методов не дает возможности в деталях разглядеть морфологию поверхностной структуры, требует высокого вакуума, а также не исключают изменений поверхности образца. Например, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), которая позволяет увидеть псевдотрёхмерное изображение наноструктурных объектов, не может дать истинного

трёхмерного пространственного представления о рельефе, а для получения высокого разрешения требует высокого вакуума и организации электропроводящего покрытия, деформирующего анализируемую поверхность.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) - один из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. За последние 10 лет сканирующая зондовая микроскопия превратилась из экзотической методики, доступной лишь ограниченному числу исследовательских групп, в широко распространенный и успешно применяемый инструмент исследования свойств поверхности. В настоящее время практически ни одно исследование в области физики поверхности и тонкопленочных технологий не обходится без применения методов СЗМ. Развитие сканирующей зондовой микроскопии послужило также основой для развития новых методов в нанотехнологии - технологии создания и коррекции структур с нанометровыми масштабами.

Использование сканирующего зондового микроскопа в режиме сканирующей туннельной (СТМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяет решить частично перечисленные проблемы и изучать рельеф как проводящих, так и диэлектрических материалов. Таким образом, использование СЗМ значительно упрощает решение ряда задач для изучения материалов наноразмерного уровня. Нанотехнологические подходы, использующие сканирующие зонды, базируются на научном фундаменте и технических приемах, разработанных для СТМ и АСМ. В их основе лежит возможность позиционирования с высокой точностью атомарно острого зонда вблизи поверхности образца.

В цикле лабораторных работ по дисциплине «Сканирующая зондовая микроскопия» студент приобретает навыки работы на сканирующем зондовом микроскопе учебно-исследовательского уровня (СЗМ «Nanoeducator»).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Нanomатериалы. Приставку нано- имеет смысл использовать к объектам и явлениям, имеющим размеры нанометрового (~ 1000 нм) диапазона, с которыми связано наличие новых или значительно отличающихся от макрообъектов и молекул свойств. Таким образом, наноматериалы - это материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками. В качестве дополнительных и уточняющих характеристик для конкретных материалов могут быть указаны доля поверхностных атомов в общем количестве атомов структурного элемента, наименьший структурный элемент, определяющий существование фазы и т.д. При этом для наноматериалов характерно наличие нижнего

критического размера, при котором нанокристаллический материал существует, как структурный элемент, имеющий упорядоченное строение, то есть кристаллическую решетку. Например, такой критический размер, в частности, для железа составляет около 0,5 нм [1].

Поверхность твердых тел. Хотя в ряде случаев влиянием поверхности на объем в первом приближении можно пренебречь, что и оправдывает представления о безграничном твердом теле, в ситуации наноструктурных материалов сами объемные свойства определяются свойствами поверхности. К морфологическим характеристикам поверхности относят форму, размер и структуру (геометрию) отдельных деталей, объектов или составных частей поверхности. На рис. 1 представлены изображения и трёхмерное представление последовательно увеличенных с одинаковым масштабом участков свободной поверхности спечённой керамики на основе оксида иттрия (YbLuYO_2), полученные методом СЭМ и методом АСМ.

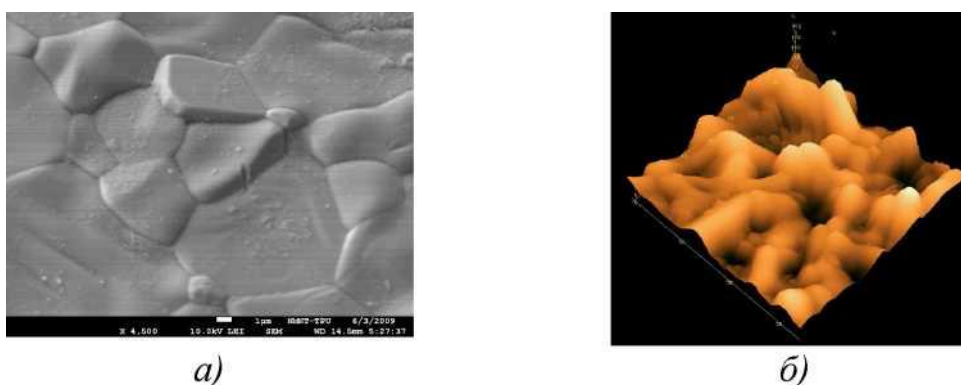


Рис. 1. Поверхность керамики YbLuYO_2 и её трёхмерное представление: а) метод СЭМ, б) метод АСМ.

Принцип работы СЗМ. Физические основы СЗМ заложены в принцип работы целого семейства сканирующих зондовых микроскопов: туннельный микроскоп (СТМ, первый СЗМ, 1981 г.), атомно-силовой микроскоп (АСМ), магнитно-силовой микроскоп (МСМ), электросиловой микроскоп (ЭСМ), ближнепольный оптический микроскоп (БОМ) и многие другие приборы, имеющие сходные принципы работы. Исследование микрорельефа поверхности и ее локальных свойств проводится с помощью специальным образом подготовленных зондов в виде игл. Рабочая часть таких зондов (остриё) имеет радиус скругления около 10 нм. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов составляет 0,1 - 10 нм. В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы неконтактного взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа основана на явлении протекания туннельного тока между остриём металлической иглы и проводящей поверхностью образца; различные типы силового взаимодействия лежат в основе работы атомно-силового, магнитно-силового и электросилового микроскопов.

Для контроля расстояния между зондом и образцом в методах ЗСМ

организована система их взаимного перемещения с постоянной оценкой силы возникающего взаимодействия. Общий принцип организации отрицательной обратной связи (ООС) сканирующего зондового микроскопа схематично представлен на рис. 2. Если существует однозначная зависимость силы взаимодействия от контролируемого расстояния, то относительная величина этой силы может быть использована для поддержания постоянного малого расстояния между зондом и образцом по схеме ООС.

В результате изменения расстояния между поверхностью и зондом в системе ООС формируется разностный сигнал, пропорциональный величине изменения действующей между ними силы. Исполнительный элемент обрабатывает данный разностный сигнал, приближая зонд к поверхности или отодвигая его до тех пор, пока разностный сигнал не станет равным нулю. Таким образом, можно поддерживать постоянное расстояние зонд-образец с высокой точностью. Совокупность данных о разностном сигнале, полученном на различных участках поверхности образца при её построчном сканировании зондом, представляет собой числовую матрицу эквивалентных рельефу поверхности значений высот, которые могут быть использованы для построения трёхмерного изображения этого рельефа.

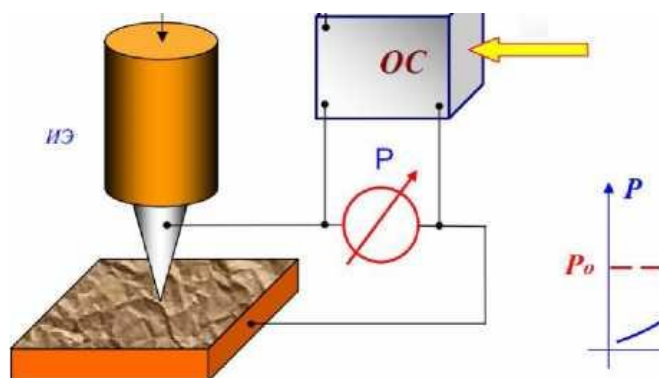


Рис. 2. Схема организации системы обратной связи СЗМ

Аналогичным образом организована схема ООС при реализации метода СТМ, однако в нём вместо контроля силы взаимодействия используют контроль протекающего туннельного тока. Пусть к поверхности электропроводящего образца на расстояние некоторого малого зазора подведен металлический зонд, заканчивающийся одним атомом. При расстоянии между ними, сравнимом с межатомным (0,1-0,3 нм), волновые функции электронов, принадлежащих атому зонда и ближайших к нему атомов на поверхности образца, будут перекрываться, обеспечивая, таким образом, благоприятные условия для туннелирования электронов через этот зазор. Туннельный ток в зазоре экспоненциально (с отрицательным показателем) зависит от величины зазора, а, следовательно, очень чувствителен к атомно-структурным неоднородностям на поверхности образца. За счет этого, перемещая зонд вдоль поверхности и контролируя протекающий по нему туннельный ток, можно анализировать топологию

поверхности с атомным разрешением. В СТМ эта идея реализуется следующим образом (рис.3) [2].

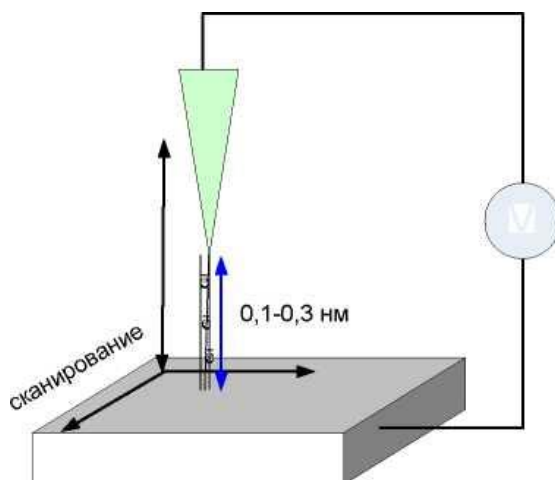
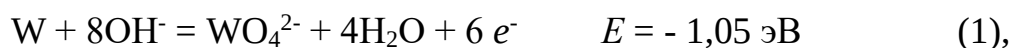


Рис. 3. Относительное расположение зонда и подложки в СТМ

АСМ, в отличие от СТМ, нечувствительна к электронным свойствам подложки. Поэтому она может быть использована для анализа поверхности как проводниковых материалов, так и диэлектрических. При этом на зонд действует сила отталкивания величиной порядка 10^{-9} Н. Эта сила задаётся пьезоэлектрическим элементом позиционирования, толкающим зонд к поверхности. Бесконтактный режим с зазором (5 - 15 нм) используется, когда имеется опасность того, что зонд может повредить поверхность [3].

Наряду с исследованием рельефа поверхности, зондовые микроскопы позволяют изучать различные свойства поверхности: механические, электрические, магнитные, оптические и многие другие.

Электрохимическое травление. Для приготовления зондового датчика используется вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм. Этот металл не окисляется кислородом воздуха, в результате чего не образуется оксидный слой, затрудняющий проведение измерений в СЗМ. Чтобы получить зонд с радиусом скругления от 10 до 50 нм используют электрохимическое травление проволоки в растворе щёлочи. Метод очень прост в исполнении и занимает считанные минуты. Электрохимическое травление предполагает растворение металла или поверхностного слоя, причём металл переходит в раствор с образованием простых или комплексных ионов, малодиссоциированных соединений металла. Одновременно с этим происходит выделение газообразного водорода или восстановление веществ, находящихся в растворе. В комплексе СЗМ «Nanoeducator» имеется электролизер, позволяющий травить проволоку в растворе щелочи при напряжении 6-9 В и силе тока 0,5 А. При пропускании тока через W проволоку в щелочном растворе будет протекать электролиз с активными (расходуемыми) электродами и эрозией одного из них до полного растворения погруженной в щёлочь части:



Прекращение гальванического контакта электрода с поверхностью раствора щёлочи по мере его эрозии сопровождается формированием на его конце острия с требуемым малым радиусом скругления.

Формирование и обработка СЗМ изображений. Для получения СЗМ изображения проводят сканирование образца. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку строки и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и затем СЗМ-изображение рельефа поверхности в виде трёхмерной функции $Z = f(x, y)$ строится с помощью средств компьютерной графики.

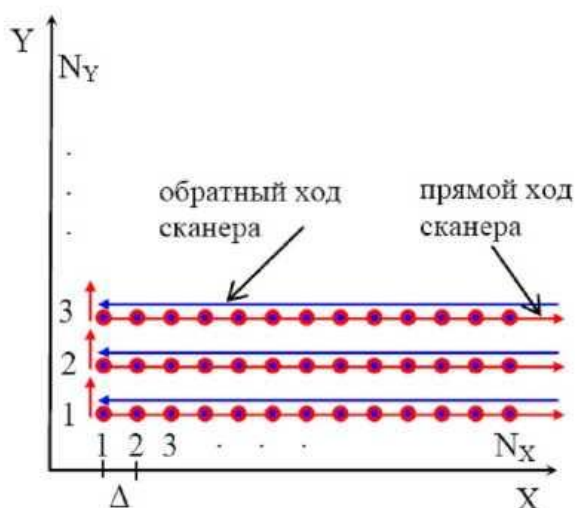
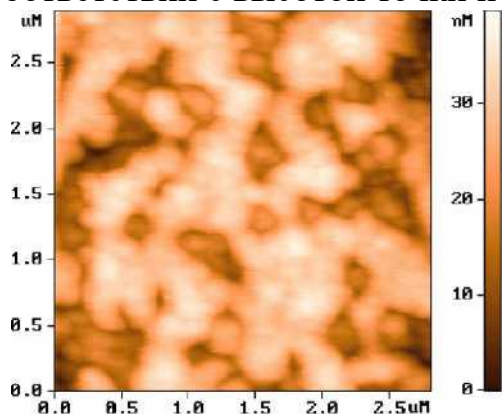


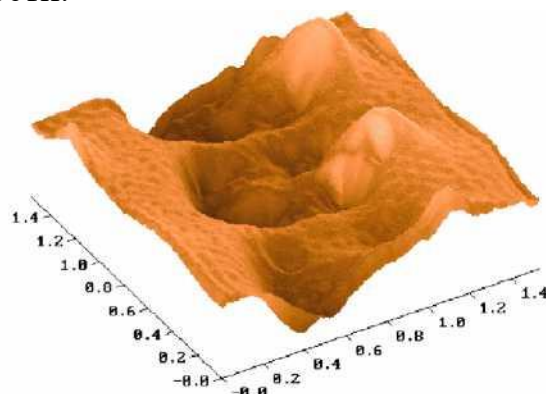
Рисунок 4. Схематическое изображение процесса сканирования

Визуализация СЗМ кадров производится в виде трехмерных (3D) и двумерных яркостных (2D) изображений. При 3D визуализации изображение поверхности $Z = f(x, y)$, соответствующей СЗМ данным, строится в аксонометрической проекции с помощью пикселей или линий. В дополнение к этому используются различные способы подсвечивания пикселей, соответствующих различной высоте рельефа поверхности. Наиболее эффективным способом раскраски 3D изображений является моделирование условий подсветки поверхности источником света, расположенным в некоторой точке пространства над поверхностью (рис.4). При этом удастся подчеркнуть мелкомасштабные неровности рельефа. Также средствами компьютерной обработки и графики реализуются масштабирование и вращение 3D СЗМ-изображений. При 2D визуализации каждой точке

поверхности $Z = f(x, y)$ ставится в соответствие цвет или яркость некоторой цветовой палитры. Наиболее широко используются градиентные палитры, в которых раскраска изображения производится тоном определенного цвета в соответствии с высотой точки поверхности.



а)



б)

Рис. 5. Изображение рельефа поверхности:
а) 2D визуализация, б) 3D визуализация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ВНИМАНИЕ, ПРЕПОДАВАТЕЛЬ! Перед выполнением работы необходимо провести для студентов инструктаж по правилам техники безопасности и пожарной безопасности при работе в учебно-исследовательском классе СЗМ «Nanoeducator».

ВНИМАНИЕ, СТУДЕНТ! К выполнению лабораторной работы студент допускается преподавателем, ведущим лабораторные занятия.

Опыт 1. Подготовка зондового датчика

- 1) Приготовьте 100 мл 10%-ного раствора гидроксида калия: путем растворения 10 г сухого КОН в 90 мл дистиллированной воды (использовать аналитические весы, мерный цилиндр).
- 2) Отрежьте 15 мм вольфрамовой проволоки ножницами.
- 3) Мягко вытяните проволоку подушечками пальцев, чтобы она была прямая.
- 4) С использованием прилагающегося приспособления аккуратно загните проволоку в форму, показанной на рис. 6.

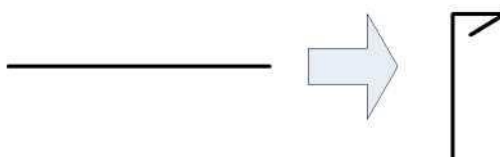


Рис. 6. Форма заготовленной проволоки для травления

- 1) Включите компьютер и загрузите программу “Camera”.
- 2) Включите электролизер, и проверьте, есть ли связь с компьютером (вы должны видеть на мониторе изображение с видеокамеры!).
- 3) Пальцами вытащите держатель зонда (2) из электролизера (см. рис.7).

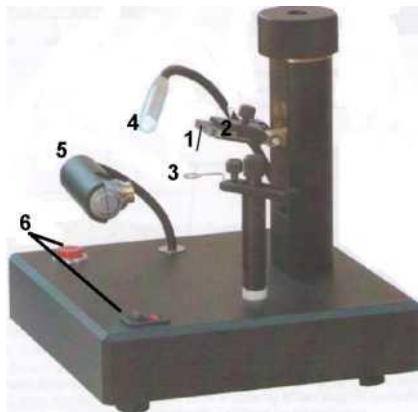


Рис. 7. Изображение электролизера:

- 1 - конец проволоки для травления,
 - 2 - держатель проволоки,
 - 3 - кольцо с пленкой раствора NaOH,
 - 4 - светодиодная лампа,
 - 5 - камера (подключенная к компьютеру),
 - 6 - кнопки включения источника напряжения.
- 4) Вставьте подготовленную проволоку (из п.4) в держатель (2), чтобы конец проволоки (1) был направлен вниз (рис.7).
 - 5) Вставьте держатель в электролизер и зафиксируйте болтом (!).
 - 6) Налейте немного раствора КОН в чашку Петри и опустите кольцо (3, рис.7) в раствор на 1-2 сек. и аккуратно извлеките. Проверьте: в кольце должна остаться пленка щелочного раствора!
 - 7) Установите кольцо с пленкой под свободным концом обрабатываемой проволоки и, поворачивая большой винт на вершине стойки, осторожно проткните пленку проволокой, чтобы её кончик вышел на 2-3 мм с другой стороны кольца. **ВНИМАНИЕ! Пленка должна оставаться целой!**
- Студенты!** Не забывайте делать снимки проводимого вами процесса (рисунки необходимы для отчета)!
- 8) Подведите встроенные лампу освещения и видеокамеру к зоне травления, контролируя качество изображения в окне программы «Camera».
 - 9) Нажмите кнопку (6), чтобы подать ток в образованную цепь и проводите

травление пока, не отпадет кончик иглы и/или не порвется пленка щёлочи. Осуществляйте визуальный контроль процесса с помощью видеокамеры.

- 10) Если плёнка порвётся до окончания травления, то повторите процедуры по п.п. 10-12. Отведите держатель зонда от кольца с помощью большого винта на вершине стойки и аккуратно вытащите зонд из держателя с помощью пинцета; промойте кончик иглы многократным окунанием в дистиллированную воду.
- 11) Осторожно вставьте зонд в держатель и оставьте сушиться для следующего опыта.

Студенты! Наклейте стикер со своей фамилией на свою коробку с зондами!

Опыт 2. Сканирование поверхности и получение изображения на СЗМ «Nanoeducator».

Студенты! Создайте папку со своим именем. В итоге эксперимента вам нужно сохранить полученные вами результаты (найденного резонанса, формы зонда, изображения поверхности образца) в папке со своим именем!

Внимание! Если на стадии подготовки зонда была использована программа «Samera», то её необходимо закрыть перед началом сканирования. В противном случае некоторые настройки сканирования могут быть заблокированы.

Устройство измерительной головки СЗМ «Nanoeducator».

На рис.8. представлен внешний вид измерительной головки СЗМ «Nanoeducator» и обозначены основные элементы прибора, используемые при работе.

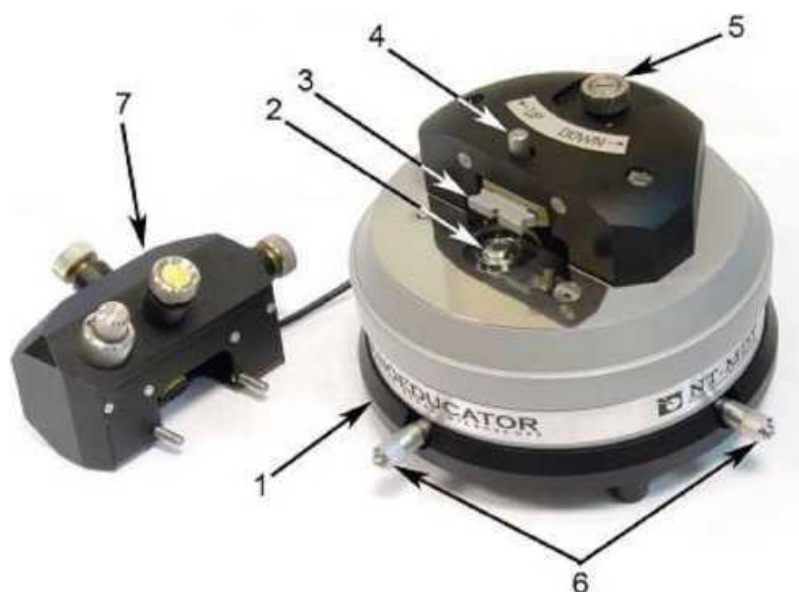
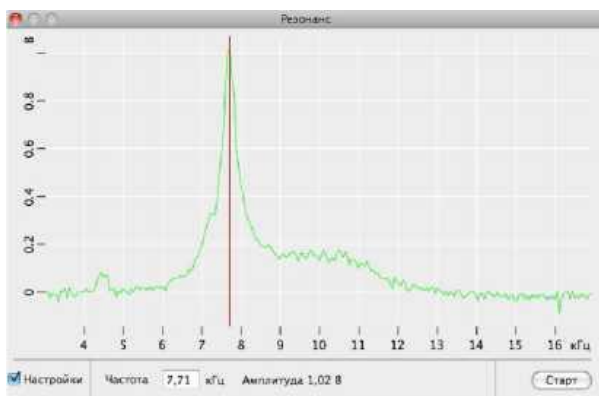


Рис. 8. Внешний вид измерительной головки СЗМ «Nanoeducator»

- 1 - основание,
- 2 - столик для образца,
- 3 - датчик взаимодействия (держатель зонда),
- 4 - винт фиксации датчика (держателя зонда),
- 5 - винт для ручного подвода зонда,
- 6 - винты для перемещения столика с образцом,
- 7 - крышка с видеокамерой и винтами для ее перемещения.



*Рис.9. Окно контроля процедуры
Настройки резонансной частоты
колебаний зонда*



*Рис.10. Окно контроля процедуры
подведения зонда к анализируемой
поверхности образца*

- 1) Получите у преподавателя образец для сканирования.
- 2) Положите образец на столик (поз. 2, рис.8) в измерительной головке СЗМ «Nanoeducator».
- 3) **Аккуратно и без усилий** переведите поворотом ручки 5 в направлении «Up» гнездо держателя зонда в верхнее положение. Если ручка 5 заблокирована (не вращается свободно), то обратитесь к преподавателю.
- 4) **Аккуратно и без усилий** вставьте держатель с зондом в измерительную головку и укреплите болтом (4) держатель в головке.
- 5) Закройте зону сканирования крышкой с камерой (7). Включите тумблер питания контроллера микроскопа и запустите программу Nanoeducator и в окне выберите режим работы с микроскопом
- 6) С помощью преподавателя проведите процедуру отыскания резонансной частоты колебаний зонда, управляя настройками в окне «Резонанс» (рис.9). В результате удачной настройки резонансный пик должен быть одиночным, амплитуда колебаний должна несколько превысить 2 В, добротность колебаний должна находиться в пределах значений от 25 до 45. Сохраните изображение резонансного пика, нажав соответствующую кнопку в окне программы и закройте окно «Резонанс».
- 7) С помощью преподавателя выполните процедуру подведения зонда к

анализируемой поверхности, контролируя процесс в окне «Подвод» (рис.10). Не пытайтесь использовать для точного подведения к поверхности прямой визуальный контроль и ручную регулировку винтом 5 - используйте для этого только кнопки окна «Подвод». В результате удачной настройки столбиковый индикатор «Z сканер» должен находиться в верхней половине шкалы (выше среднего положения, - в области трёх верхних делений). Если в результате «Быстрого» подведения индикатор переместился в нижнюю часть шкалы, то кнопкой со стрелкой вверх выполните поднятие зонда на несколько десятков шагов и подведите его снова, но уже в режиме медленного подвода (снимите метку напротив слова «Быстро». По окончании процедуры сохраните изображение окна «Подвод» на рабочем столе нажатием комбинации клавиш <Shift-Cmd-4>, и переместите это изображение в личную папку. Закройте окно «Подвод», вызовите вкладку настройки сканирования и с помощью преподавателя внимательно ознакомьтесь с её содержанием. Если вкладка настроек сканирования пуста, то убедитесь, что вы закрыли окна поиска резонанса и подведения зонда.

- 8) Рекомендуемые значения пробного сканирования следующие: на квадратном поле размером 70000 x 70000 нм выберите разрешение не более 300; скорость прямого хода сканера должна находиться в пределах 5-10 мкм/с, обратного - 10-15 мкм/с . Ползунок усиления обратной должен находиться на значении 2-3.
- 9) После проверки настроек преподавателем запустите процедуру сканирования кнопкой «Пуск» основного окна программы и наблюдайте построение 3D-поверхности анализируемого образца. При получении изображений неудовлетворительного качества повторите процедуру настройки параметров сканирования: если на изображении наблюдаются срывы строк сканирования, то увеличьте разрешение в 1,5-2 раза и уменьшите значения скорости сканирования на 10-20%; если на изображении присутствует высокочастотный шум (рябь), то уменьшите усиление обратной связи до значения 2. Если качество изображения не улучшится, то повторите процедуру поиска резонанса и подведения зонда к поверхности.
- 10) По окончании сканирования полученное изображение будет автоматически передано в программу визуализации и обработки «ScanViewer».

Студенты! Сохраните полученные вами изображения (найденного резонанса, формы зонда, изображения поверхности) в личной папке!

ВНИМАНИЕ, СТУДЕНТ! Итогом выполнения работы считается оформленный и сданный преподавателю отчет с полученными изображениями, оценка выставляется преподавателем после защиты отчета.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о проделанной работе должен включать:

- название работы;
- цель каждого опыта;
- глоссарий (используемые в работе термины);
- краткое описание сканирующей зондовой микроскопии;
- устройство измерительной головки и электролизера СЗМ Nanoeducator;
- экспериментальные данные (принтскрины процесса травления и подведенного зонда к поверхности образца, фотографию готового зонда, снимки профиля резонансного пика, снимок подведённого к образцу зонда, 2D и 3D изображения полученного скана поверхности);
- выводы о методах, используемых в работе для подготовки зондового датчика и сканирования поверхности. К отчету необходимо приложить файлы, используемые в работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое наноматериалы?
2. Что относят к морфологическим характеристикам поверхности?
3. В чем заключается принцип работы СЗМ?
4. Какие виды СЗМ вы знаете?
5. В чем заключается принцип организации обратной связи?
6. В чем отличие АСМ от СТМ?
7. В чем заключается электрохимическое травление?
8. Как выглядит измерительное устройство СЗМ Nanoeducator?
9. Как работает электролизер СЗМ Nanoeducator?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 192 с.] [Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. - М.: Физматлит, 2001. - 224 с.
2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. - Нижний Новгород: Изд. РАН. - 2004. - 114 с.
3. Борисенко В.Е., Воробьева А.И. Нанoeлектроника. Учебное пособие. Минск: БГУИР, 2003. - 76с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

**Методические указания для обучающихся по организации и проведению
самостоятельной работы**

Направление подготовки 03.03.02 Физика
Направленность (профиль)
«Фундаментальная и прикладная физика»

**Ставрополь
2026**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	19
План-график выполнения самостоятельной работы	22
Методические рекомендации по изучению теоретического материала, подготовке к лабораторным работам	24

Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студента).

Самостоятельная работа студента является важным видом учебной и научной деятельности студента. Федеральным государственным образовательным стандартом предусматривается значительный объем времени из общей трудоемкости дисциплины на самостоятельную работу. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому самостоятельная работа должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования – подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студента предполагает, прежде всего, его научно-исследовательскую и практическую деятельность, поскольку именно

эти виды учебной работы в первую очередь готовят к самостоятельному выполнению профессиональных задач. Конечной целью самостоятельной работы является организация самостоятельной познавательной деятельности, формирование умения самостоятельно анализировать информацию, выделять главное и второстепенное.

Основными формами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Сканирующая зондовая микроскопия» являются:

- подготовка к лабораторной работе;
- самостоятельное изучение литературы;

Лабораторная работа – подразумевает изучение определенного физического процесса на практике, используя при этом методы, предварительно изученные на лекциях, выбор наиболее оптимального приема выполнения замеров и исследования, которые обеспечивает наиболее точный результат, определение фактического результата и его сравнение с теоретическими данными, описанными в учебнике согласно выбранной тематике, обнаружение причин полученного несоответствия и грамотное изложение их в отчете лабораторной работы, грамотное оформление выводов согласно требованиям методички.

В результате изучения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции (в соответствии с образовательным стандартом):

ПК-1- Способен применять фундаментальные знания в области физики и математики для постановки и решения научно-исследовательских и прикладных задач в своей профессиональной деятельности

ПК-2 - Способен проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта

ИД-4_{ПК-5} - Владеет современным программным обеспечением, в том числе текстовыми редакторами и графическими программами, средствами

подготовки обзоров, отзывов, отчетов, заключений В результате освоения дисциплины, обучающийся должен:

Знать физические принципы зондовой микроскопии, основы современных методов работы на зондовых микроскопах

Уметь применять методики сканирующей зондовой микроскопии для анализа свойств поверхности, применять методики туннельной и атомно-силовой микроскопии для анализа свойств различных материалов

Владеть навыками работы на сканирующем зондовом микроскопе, навыками обработки данных в сканирующей зондовой микроскопии.

План-график выполнения самостоятельной работы

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
Подготовка к лабораторной работе «Общие принципы и возможности сканирующей зондовой микроскопии»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 1
Подготовка к лабораторной работе «Устройство сканирующего зондового микроскопа»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 2
Подготовка к лабораторной работе «Сканирующая туннельная микроскопия»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 3
Подготовка к лабораторной работе «Атомно-силовая микроскопия»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 4
Подготовка к лабораторной работе «Исследование свойств поверхности методами сканирующей зондовой микроскопии»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 5
Подготовка к лабораторной работе «Формирование и обработка СЗМ-изображений»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 6
Подготовка к лабораторной работе «Устройство и подготовка к работе сканирующего зондового микроскопа «Nanoeducator»»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 7
Подготовка к лабораторной работе «Исследование поверхности твердых тел методом сканирующей туннельной микроскопии»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 8
Подготовка к лабораторной работе	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 9

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Время сдачи
«Исследование поверхности методом атомно-силовой микроскопии в неконтактном режиме»			
Подготовка к лабораторной работе «Обработка и количественный анализ изображений, полученных на СЗМ «Nanoeducator»»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 10
Подготовка к лабораторной работе «Сканирующая зондовая литография»	Отчет	Собеседование	Лабораторная работа № 11
Самостоятельное изучение литературы	Конспект	Собеседование	

Методические рекомендации по изучению теоретического материала, подготовке к лабораторным работам

При подготовке к лабораторным занятиям необходимо:

- повторить материал соответствующих лекций;
- внимательно изучить описание лабораторного занятия, изложенное в практикуме;
- ответить на вопросы по содержанию лабораторного занятия, задаваемые преподавателем на предварительном опросе перед выполнением заданий.

Все лабораторные занятия предполагают выполнение заданий, решение задач.

В результате выполнения заданий достигаются следующие результаты обучения:

- развитие мышления и творческих способностей студента,
- приобретение и закрепление навыков самостоятельной работы,
- приобретение и закрепление навыков оформления и составления письменных заданий.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет о проделанной работе должен включать:

- название работы;
- цель каждого опыта;
- глоссарий (используемые в работе термины);
- краткое описание сканирующей зондовой микроскопии;
- устройство измерительной головки и электролизера СЗМ Nanoeducator;
- экспериментальные данные (принтскрины процесса травления и подведенного зонда к поверхности образца, фотографию готового зонда, снимки профиля резонансного пика, снимок подведённого к образцу зонда, 2D и 3D изображения полученного скана поверхности);
- выводы о методах, используемых в работе для подготовки зондового датчика и сканирования поверхности. К отчету необходимо приложить файлы, используемые в работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

10. Что такое наноматериалы?
11. Что относят к морфологическим характеристикам поверхности?
12. В чем заключается принцип работы СЗМ?

13. Какие виды СЗМ вы знаете?
14. В чем заключается принцип организации обратной связи?
15. В чем отличие АСМ от СТМ?
16. В чем заключается электрохимическое травление?
17. Как выглядит измерительное устройство СЗМ Nanoeducator?
18. Как работает электролизер СЗМ Nanoeducator?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 192 с.] [Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. - М.: Физматлит, 2001. - 224 с.
2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. - Нижний Новгород: Изд. РАН. - 2004. - 114 с.
3. Борисенко В.Е., Воробьева А.И. Нанoeлектроника. Учебное пособие. Минск: БГУИР, 2003. - 76с.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Каковы основные узлы сканирующего туннельного микроскопа?
2. Какова предыстория создания СЗМ, для каких целей его планировалось использовать?
3. Какие разновидности зондовых микроскопов вам известны?
4. На каком эффекте основан принцип действия СТМ? В каких еще явлениях встречается этот эффект? Кто впервые его описал?
5. Каков принцип действия АСМ?
6. Чем отличаются контактный и бесконтактный режимы в АСМ?
7. Как детектируется взаимодействие между зондом и поверхностью в АСМ?
8. Для каких исследований применяется СЗМ в физике?
9. Что такое пьезоэффект?
10. Какова конструкция и принцип работы пьезоэлементов?
11. Какие разновидности сканеров вам известны?
12. К каким искажениям приводит использование пьезосканеров?
13. Как изготавливают кантилеверы для СЗМ?
14. Как устроена система сканирования в СЗМ Nanoeducator?
15. Каковы возможные искажения изображений, причиной которых являются зонды? Сканеры? Каковы методы их коррекции?
16. Что такое туннельный эффект? От каких параметров зависит туннельный ток?

17. Каким образом производится регистрация туннельного тока в сканирующем туннельном микроскопе?
18. Какие требования предъявляются к зондам для сканирующей туннельной микроскопии? Какие существуют способы их изготовления?
19. Почему считают, что 90% туннельного тока протекает через крайний атом зонда?
20. Что такое режим постоянного тока и постоянной высоты? Что такое V- и Z-модуляции, для чего их применяют?
21. Как устроена система регистрации туннельного тока в СЗМ Nanoeducator?
22. Что такое «квантовый загон или квантовый коралл»? Какое отношение он имеет к сканирующей туннельной микроскопии?
23. Как применяют сканирующую туннельную спектроскопию для исследования электронной структуры поверхностей полупроводников?
24. Чем отличаются контактная и полуконтактная методики? Оцените их достоинства и недостатки.
25. Чем определяется сила взаимодействия зонда с поверхностью?
26. Как используется для измерения силы взаимодействия зонда с поверхностью четырехсекционный фотодиод?
27. Какова причина гистерезиса на кривой подвода и отвода зонда от образца?
28. Каково влияние капиллярных и адгезионных взаимодействий в атомно-силовой микроскопии?
29. Как регистрируют силу взаимодействия зонда и образца в бесконтактной методике?
30. Что такое метод отображения фазы и метод рассогласования обратной связи?
31. Как реализуется атомно-силовая микроскопия в СЗМ Nanoeducator? Какие из методик при этом могут использоваться?
32. Что такое двухпроходные методики, в чем их отличие от однопроходных, для чего они нужны?
33. Каким образом можно измерить значение коэффициента трения при помощи МЛС?
34. Что такое динамическая и статическая магнито-силовая микроскопия? В чем их отличие?
35. Можно ли измерить магнитные характеристики материала (магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность насыщения) при помощи магнитно-силовой микроскопии?
36. Покажите, что сила электростатического взаимодействия зонда с поверхностью, измеренная на частоте 2ω , зависит от диэлектрических свойств поверхности и не зависит от её потенциала.
37. Как измерить петлю гистерезиса пьезоэлектрика при помощи микроскопии пьезоотклика?

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация в форме экзамена в 7 семестре.

Список рекомендуемой литературы.

Основная литература:

- *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н.Новгород, 2004.
- *Nanoeducator.* Руководство пользователя. NT-MDT, 2008.
- *Nanoeducator.* Сканирующая зондовая микроскопия, спектроскопия и литография. Учебное пособие (для программного обеспечения под Mac OS X). NT-MDT, 2008.

Дополнительная литература:

- *Суслов А.А., Чижик С.А.* Сканирующие зондовые микроскопы // Материалы, технологии, инструменты. 1997, №3.
- *Бинниг Г., Рорер Г.* Сканирующая туннельная микроскопия: от рождения к юности // Успехи физических наук. 1988. Т. 152, вып.2.
- *Пул Ч., Оуэнс Ф.* «Нанотехнологии». М.: Техносфера, 2006.
- «Нанотехнологии. Азбука для всех». Сборник статей под редакцией Ю.Д. Третьякова, М.: Физматлит, 2007.

Интернет-ресурсы:

- <http://www.nanometer.ru/> - сайт нанотехнологического сообщества «Нанометр» (Факультет наук о материалах МГУ)
- www.ntmdt.ru - сайт отечественного производителя сканирующих зондовых микроскопов компании NT-MDT.
- www.spmtips.com, www.veeco.com, www.spmtips.com, www.parkafm.com – сайты производителей сканирующих зондовых микроскопов и зондов для них.

Программное обеспечение:

- специализированное программное обеспечение, входящее в комплект поставки приборов «Nanoeducator».

Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

- сканирующие зондовые микроскопы «Nanoeducator», компьютер, мультимедиапроектор.