

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

Методические указания

Шишкин Е.И.
Николаева Е.В.

Подпись руководителя ИОНЦ
Дата

**Екатеринбург
2008**

Методические указания по изучению специальной дисциплины «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» составлены 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

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для студентов, изучающих специальную дисциплину «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии», и призваны помочь успешному освоению теоретического и практического материала курса и достижению основной его цели – ознакомления с техникой сканирующей зондовой микроскопии – одним из наиболее мощных и универсальных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердых тел с нанометровым пространственным разрешением.

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

В рамках данного курса 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 NanoEducator (производство компании НТ-МДТ). Успешное освоение курса предполагает выполнение трех лабораторных работ, посвященных визуализации нанообъектов с помощью сканирующей туннельной микроскопии (лабораторная работа №1) и полуконтактной атомно-силовой микроскопии (лабораторная работа №2), а также проведению наноманипуляций в режиме силовой динамической нанолитографии (лабораторная работа №3). Особое внимание будет уделено теоретическому и практическому освоению методов математической обработки и количественного анализа изображений сканирующей зондовой микроскопии.

В ходе курса будет проведено несколько семинаров, на которых студенты получают возможность сделать доклады по использованию сканирующей зондовой микроскопии для исследования новых перспективных наноматериалов. Для подготовки к семинарам необходимо пользоваться соответствующей учебно-научной литературой, имеющейся в библиотеке УрГУ, а также общедоступными интернет-порталами, содержащими большое количество как научно-популярных, так и узкоспециализированных статей, посвященных различным аспек-

там развития и применения сканирующей зондовой микроскопии. К числу рекомендуемых сайтов можно отнести следующие:

Компания «НТ-МДТ»: <http://www.ntmdt.ru>

Портал «Нанометр»: <http://www.nanometer.ru>

Центра перспективных технологий: <http://www.nanoscopy.net>

Учебно-научный центр «Бионаноскопия»: <http://www.nanoscopy.org>

Объединенная группа МГУ «Сканирующая зондовая микроскопия»:
<http://www.spm.genebee.msu.ru>

Российское общество сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологий:
<http://www.nanoworld.org>

СОСТАВ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Учебно-методический комплекс дисциплины «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии» включает в себя программу дисциплины, данные методические указания, вопросы для самоконтроля, вопросы к зачету, набор презентаций и руководство к лабораторным и практическим занятиям. Все эти материалы могут использоваться студентами в индивидуальном порядке при подготовке к занятиям и зачету.

Тема 1. Введение

В рамках первой темы дается краткий обзор содержания курса, разъясняются общие положения организации учебного процесса при изучении данной дисциплины, порядок выполнения лабораторных работ, проведения учебных семинаров и зачетных мероприятий. Также дается обзор русскоязычной учебно-научной литературы по вопросам, непосредственно изучаемым в рамках данной конкретной дисциплины.

Тема знакомит обучающихся с начальными сведениями из современной междисциплинарной области практических знаний – нанотехнологий, даются определения таких базовых понятий, как нанонаука, наноматериалы, наноинженерия, наноструктурированные материалы, и, собственно, нанотехнологии. Дано определение места нанообъектов на общей шкале размеров и их классификация в терминах пространственной размерности. Приведены примеры наиболее известных наноматериалов: углеродные фуллерены и нанотрубки, графены, ДНК.

В качестве исторической справки даются основные этапы развития сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Далее рассматриваются общие устройство и принципы работы, присущие подавляющему большинству современных СЗМ. Изучаются вопросы, связанные с

устройством и назначением зондовых датчиков, сканирующих элементов, цепи обратной связи. Дается краткое описание основных типов взаимодействия между зондом и образцом, а также классификация методов СЗМ по типу взаимодействия и способу его регистрации.

Тема 2. Сканирующие элементы зондовых микроскопов

В рамках данной темы студенты должны изучить назначение, основные принципы работы и варианты реализации сканирующих элементов (сканеров) – одних из наиболее важных компонентов, обеспечивающих беспрецедентное пространственное разрешение СЗМ. Будут рассмотрены различные типы сканеров (триподные, трубчатые, биморфные и гибридные), применяемые в СЗМ, и основные свойства пьезокерамических материалов, лежащие в основе изготовления этих элементов. Кроме того, кратко будет дан обзор конструктивных особенностей элементов СЗМ, отвечающих за грубый подвод и перемещения зонда относительно исследуемой поверхности: редукторы перемещений, шаговые электро- и пьезодвигатели.

Особое внимание должно быть уделено рассмотрению вопросов, связанных с защитой СЗМ от механических вибраций, акустических шумов и термодрейфов, как одних из наиболее критичных факторов, определяющих качество СЗМ изображений. Должны быть рассмотрены пассивные и активные виброизолирующие системы, их принцип работы и рабочие характеристики.

Тема 3. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия

При изучении данной темы необходимо тщательным образом рассмотреть и уяснить суть физических явлений, лежащих в основе работы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). С фундаментальной точки зрения должны быть изучены следующие вопросы: функция состояния системы и, уравнение Шредингера, зонная структура металлов и энергетическое распределение электронов, туннельный эффект, туннельный эффект в квазиклассическом приближении. В качестве конкретных примеров, играющих принципиальную роль для СТМ, необходимо рассмотреть туннельный ток в системах металл-диэлектрик-металл и металл-диэлектрик-полупроводник.

После изучения фундаментальных вопросов следует рассмотреть техническое устройство и принцип работы СТМ: туннельный сенсор, режимы постоянной высоты и постоянного тока, реализация системы обратной связи. Отдельно внимание должно быть уделено требованиям, предъявляемым к зондам СТМ, и методам их изготовления.

По результатам изучения первой части темы, обучающиеся должны четко представлять физические принципы, лежащие в основе СТМ, понимать ограничения, накладываемые СТМ на свойства образцов, знать, каким образом и в каком режиме достигается атомарное разре-

шение СТМ.

Вторая часть темы посвящена дополнительным измерительным методикам, основанным на СТМ, к которым относятся измерения локальной работы выхода и распределения плотности электронных состояний, измерение кривых подвода и оценка качества зондов по этим кривым. Особое внимание следует уделить методике сканирующей туннельной спектроскопии. Обучающиеся должны четко понимать, какие именно физические величины и сигналы СТМ измеряются и анализируются в этих методиках.

В заключении должны быть подробно рассмотрены несколько примеров использования СТМ для исследования наноматериалов. Необходимые практические навыки работы в режиме СТМ должны быть приобретены в ходе выполнения лабораторной работы №1.

Тема 4. Атомно-силовая микроскопия

4.1. Зондовые датчики для атомно-силовой микроскопии

В этой части темы обучающимся будет представлена информация о назначении, основных характеристиках и технологии изготовления кантилеверов – зондовых датчиков, используемых в атомно-силовой микроскопии (АСМ). Будут рассмотрены различные типы силового взаимодействия кантилеверов с поверхностью, построена кривая зависимости силы взаимодействия от расстояния между зондом и образцом и определены для этой кривой участки, соответствующие различным режимам работы АСМ: контактная АСМ, бесконтактная и полуконтактная АСМ. Далее должны быть подробно изучены вопросы динамики системы кантилевер (зонд) – поверхность при квазистатическом воздействии нормальных, продольных и поперечных сил, а также при взаимодействии зонда с поверхностью в условиях вынужденных резонансных колебаний кантилевера.

4.2. Контактная атомно-силовая микроскопия

В рамках данной части темы должны быть подробно рассмотрены вопросы, связанные с устройством и принципом работы СЗМ в контактном режиме АСМ: устройство оптического силового сенсора, режимы постоянной высоты и постоянной силы, назначение и принципы работы обратной связи, реализация атомарного пространственного разрешения, ограничения и недостатки методики.

Дальнейшее изложение материала посвящено дополнительным измерительным методикам, основанным на контактном режиме АСМ и позволяющим проводить исследования различных механических свойств материалов с нанометровым пространственным разрешением. При изучении методики микроскопии сил трения необходимо уделить внимание вопросам, связанным с методом регистрации латеральных сил взаимодействия зонда и образца, вкла-

дами топографии и неоднородности коэффициента трения, качественной интерпретацией результатов измерений в это методике. Аналогично должны быть рассмотрены особенности, связанные с реализацией модуляционных методик на базе контактной АСМ: микроскопии модуляции силы и атомно-силовой акустической микроскопии, позволяющих проводить измерения пространственного распределения микротвердости, упругих констант и адгезионных свойств исследуемой поверхности.

4.3. Бесконтактная и полуконтактная методики атомно-силовой микроскопии

Данная часть курса требует особо внимательного изучения, поскольку именно принципы и подходы бесконтактной и полуконтактной АСМ лежат в основе подавляющего большинства разнообразных режимов СЗМ, позволяющих проводить измерения магнитных, электрических и других свойств поверхности. Для детального понимания материала необходимо рассмотреть вопросы теории механических колебаний кантилевера, зависимость амплитуды и фазы вынужденных колебаний кантилевера от расстояния между зондом и образцом, особенности поведения системы в бесконтактном и полуконтактном режиме колебаний кантилевера. Далее должны быть непосредственно изучены практические вопросы, связанные с устройством и принципами работы СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах АСМ, методами введения обратной связи для контроля расстояния между зондом и образцом, проведением измерений в режиме отображения фазы.

В результате изучения этой части курса обучающиеся должны четко представлять себе основные принципы работы СЗМ в режимах колебательных методик АСМ, понимать преимущества и недостатки этих методик по сравнению с контактной АСМ, знать стратегию выбора оптимальных параметров колебаний кантилевера и режима сканирования при исследовании различного типа объектов.

В заключении должны быть подробно рассмотрены несколько примеров использования колебательных АСМ для исследования наноматериалов и биологических объектов. Необходимые практические навыки работы в режиме полуконтактной АСМ должны быть приобретены в ходе выполнения лабораторной работы №2.

Тема 5. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии

Материал, представленный в рамках этой темы, дает обучающимся представление о параметрах, влияющих на качество и пространственное разрешение изображений, получаемых с помощью СЗМ. Дается перечисление основных источников искажений и артефактов, возникающих при СЗМ измерениях. Понимание этого материала позволит обучающимся избежать в будущем ошибок, связанных с попыткой научной трактовки различных артефактов,

возникающих вследствие несовершенства техники или некорректных условий наблюдения.

Первой частью темы дается информация об искажениях, обусловленных несовершенством сканирующих элементов СЗМ: нелинейность, крип, гистерезис пьезокерамики. Приводятся программные и аппаратные методы компенсации недостатков сканирующих элементов, рассказывается об устройстве сканеров с линеаризующими элементами.

Вторая часть посвящена влиянию формы зондов на качество СЗМ изображений и эффекту конволюции. Приведены методы диагностики наличия искажений, обусловленных несовершенной формой зонда, методы определения реальной формы зонда и деконволюции результатов измерений.

Тема 6. Магнитная силовая микроскопия

Начиная с этой части курса будут приводиться подробные сведения о различных методиках СЗМ, построенных, как правило, на базе контактной или полуконтактной (бесконтактной) АСМ методиках, и позволяющих дополнительно проводить измерения различных физических свойств поверхности (магнитных, электрических, оптических и др). Непосредственно в рамках данной темы приводятся сведения о реализации исследования 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 качества получаемых изображений, реализация квазистатических и колебательных методик МСМ. Особенно важно усвоить материал, связанный с реализацией двухпроходных АСМ методик, которые используются не только для магнитных, но и для многих других измерений, например электрических.

В заключении темы приводятся примеры исследования магнитных наночастиц методом МСМ.

Тема 7. Электрические методики сканирующей зондовой микроскопии

7.1. Контактные электрические методики сканирующей зондовой микроскопии

В рамках данной темы дается материал, посвященный исследованию электрических свойств материалов с помощью СЗМ. В первой части темы рассматриваются общие вопросы, связанные с требованиями к зондовым датчикам для проведения электрических СЗМ измерений, дается постановка задачи об электромеханическом взаимодействии между кантилевером и образцом. Далее рассматривается несколько конкретных электрических методик, реализованных на базе контактной АСМ: сканирующая микроскопия сопротивления растека-

ния, контактная сканирующая емкостная микроскопия, силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика, сканирующая микроскопия нелинейной диэлектрической проницаемости. По каждой методике рассматриваются основные физические и технические стороны реализации, измеряемые величины, подходы к интерпретации результатов, а также обсуждаются факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в перечисленных контактных электрических методиках СЗМ. В качестве примера использования контактных электрических методик СЗМ рассматриваются результаты исследования кинетики нанодоменов в сегнетоэлектриках.

7.2. Двухпроходные электрические методики сканирующей зондовой микроскопии

Вторая часть темы посвящена реализации электрических двухпроходных методик СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах. Достаточно большое внимание в рамках данной части уделяется рассмотрению особенностей вынужденных колебаний кантилевера при электростатическом взаимодействии зонда с поверхностью при приложении постоянного и переменного электрического напряжения между зондом и образцом. Такое внимание обусловлено важностью понимания динамики кантилевера при такого рода воздействиях для дальнейшего усвоения материала, связанного с реализацией конкретных методик: электрической силовой микроскопии, микроскопии поверхностного потенциала (метод зонда Кельвина), сканирующей емкостной микроскопии. Так же, как и в случае с контактными электрическими методиками, здесь рассматриваются физические и технические стороны реализации методик, измеряемые величины, подходы к интерпретации результатов, а также обсуждаются факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в перечисленных двухпроходных электрических методиках СЗМ.

Тема 8. Оптические методики сканирующей зондовой микроскопии

8.1. Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия

Данная тема возвращает обучающихся к классическим методам оптической микроскопии и демонстрирует значительные преимущества этих методов с точки зрения универсальности и богатства различных способов получения функционального контраста на оптических изображениях. Вместе с тем, основным недостатком классической оптической микроскопии является сравнительно низкое пространственное разрешение, что обусловлено оптическим дифракционным пределом. Далее рассказывается идея использования конфокальной оптической микроскопии для повышения пространственного разрешения. Рассматривается устройство и принцип работы сканирующего лазерного конфокального микроскопа, возможность

трехмерного сканирования оптически прозрачных материалов. Важно обратить внимание на приводимые оценки горизонтального и вертикального разрешения конфокальной методики в сравнении с классической оптической микроскопией. Как развитие методики рассматривается идея, физические основы, особенности технической реализации и аналитические возможности сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния.

8.2. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия

В развитие темы совершенствования возможностей оптических методов микроскопии с целью повышения пространственного разрешения обсуждается идея сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. С физической точки зрения рассматриваются особенности прохождения света через субволновую диафрагму, характеристики возникающего при этом ближнего и дальнего поля оптического излучения, а также формулируются требования к проведению измерений, которые обеспечили бы эффективное преодоление оптического дифракционного предела. Далее более предметно рассматриваются устройство, принцип действия, типы используемых зондов и основные режимы работы сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. Большое внимание уделяется методике регистрации резонанса поперечных сил для контроля расстояния между оптическим зондом и поверхностью, реализации системы обратной связи и регистрации топографии поверхности. Данный подход к измерению топографии поверхности может рассматриваться как еще один самостоятельный вариант АСМ методики, который может использоваться и при построении других методов СЗМ. В заключении темы даются общие представления о перспективной методике безапертурной сканирующей ближнепольной оптической микроскопии и связанном с ней эффектом гигантского усиления сигнала комбинационного рассеяния вблизи острия проводящего зонда.

Тема 9. Сканирующая зондовая литография

Данная тема знакомит обучающихся с физическими основами 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. По каждой литографической методике рассматриваются вопросы, связанные с особенностями протекания соответствующих физико-химических процессов, обусловленных тем или иным локальным воздействием со стороны зонда СЗМ, обсуждаются вопросы предельного пространственного разрешения, достижимого в рамках этих методик. Рассматриваются также общие технические вопросы, связан-

ные с реализацией в этих методиках режимов векторной и растровой зондовой литографии.

В заключении темы рассматриваются примеры использования различных методов нанолитографии в разнообразных средах при использовании СЗМ подходов. Необходимые практические навыки использования зондовой литографии даются в ходе выполнения лабораторной работы №3 на примере динамической силовой литографии.

Тема 10. Анализ результатов сканирующей зондовой микроскопии

В заключительной теме курса рассматриваются основные типы данных, получаемых при СЗМ измерениях и варианты их графического представления, математической обработки и анализа. На примере обработки результатов измерения топографии поверхности рассматриваются общие методы коррекции (фильтрация и вычитание систематических составляющих: общее смещение, постоянный наклон, поверхности высших порядков, соответствующие неидеальной траектории движения сканера) и статистического анализа (использование преобразования Фурье и расчет функции автокорреляции, определение шероховатости, статистика зерен, фрактальный анализ) СЗМ изображений.

Практические навыки в графическом представлении результатов СЗМ измерений, математической обработке и анализе СЗМ изображений, будут получены в ходе выполнения предложенных лабораторных работ.

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.

ГЛОССАРИЙ

В данном разделе приведены наиболее важные понятия и определения, а также список основных сокращений, используемых в курсе «Исследование наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии».

АСМ – *атомно-силовая микроскопия*; разновидность *СЗМ*, основанная на детектировании сил межатомного взаимодействия с помощью острого механического зонда.

ДНК – длинные молекулярные цепи, состоящие из четырех видов нуклеотидов; порядок этих нуклеотидов кодирует информацию, необходимую для построения молекул белка. ДНК – генетический материал клеток.

МСМ – *магнитная силовая микроскопия*; разновидность двухпроходной методики полуконтактной или бесконтактной *АСМ*, основанная на детектировании магнитного взаимодействия зонда, имеющего магнитное покрытие, с поверхностью магнитных материалов.

СЗМ – *сканирующая зондовая микроскопия*; широкий класс методик, основанных на исследовании различных классов материалов с нанометровым пространственным разрешением с помощью разнообразных зондовых датчиков: туннельных, механических, оптических и др.

СТМ – *сканирующая туннельная микроскопия*; родоначальница *СЗМ*, основанная на детектировании туннельного тока между проводящей поверхностью исследуемого материала и острой проводящей иглой микроскопа.

Автосборка – процесс конструирования наноматериалов по принципу «снизу-вверх», основанный на механосинтезе и выполняемый с использованием некоторой автоматизированной системы (например *СТМ*) по заданной программе.

Атомно-силовая акустическая микроскопия – разновидность контактной *АСМ*, основанная на детектировании амплитуды и фазы механических колебаний *кантилевера*, возбуждаемых звуковыми колебаниями, распространяющимися через исследуемую среду от пьезоизлучателя, служащего подложкой для образца.

Безапертурная сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия – разновидность *сканирующей ближнепольной оптической микроскопии*; основана на детектировании ближнепольного оптического излучения, возникающего в результате взаимодействия безапертурного источника света нанометровых размеров (переизлучение от обычного механического

зонда со специальным отражающим покрытием) с поверхностью материала.

Графен – слой атомов углерода, соединённых в гексагональную двумерную кристаллическую решётку.

Домен – топологически (пространственно) связанные области с одинаковым направлением спонтанной поляризации в *сегнетоэлектрике*.

Доменная инженерия – совокупность методов, направленных на создание в *сегнетоэлектриках* доменных структур заданной геометрии.

Кантилевер – механический зондовый датчик для *АСМ* методик, представляющий собой балку, жестко закрепленную с одной стороны и имеющую острую иглу с радиусом закругления порядка 10 нм.

Контактная сканирующая емкостная микроскопия – разновидность контактной *АСМ*; позволяет проводить измерения изменений контактной емкости зонд-образец в диэлектрических и полупроводниковых материалах с целью определения пространственного распределения концентрации и типа носителей заряда в материале.

Метод отображения фазы – разновидность полуконтактной или бесконтактной *АСМ*, основанная на детектировании сдвига фаз между возбуждающими электрическими колебаниями, подаваемыми на пьезоизлучатель в основании держателя кантилевера, и реальными детектируемыми механическими колебаниями кантилевера. Локальные изменения измеряемого сдвига фаз несут информацию о гетерофазности исследуемой поверхности.

Микроскопия модуляции силы – разновидность контактной *АСМ*, основанная на детектировании изменений амплитуды механических колебаний кантилевера вследствие неоднородного распределения упругих или адгезионных свойств поверхности.

Микроскопия поверхностного потенциала (метод зонда Кельвина) – разновидность двухпроходной полуконтактной или бесконтактной *АСМ*, позволяющая проводить измерения пространственного распределения электрического потенциала на исследуемой поверхности.

Микроскопия сил трения – разновидность контактной *АСМ*, основанная на детектировании поперечных торсионных деформаций кантилевера в процессе сканирования поверхности образца в режиме постоянной силы.

Наноинженерия – деятельность, направленная на поиск эффективных методов применения наноматериалов.

Нанокристаллический материал – поликристаллический материал с размерами отдельных кристаллитов (зерен) менее 100 нм.

Нанонаука – совокупность знаний о свойствах вещества в нанометровом масштабе.

Нанообъект – фрагмент вещества, ограниченный хотя бы в одном из пространственных измерений размером менее 10 нм.

Наноструктурированный материал – материал с микро- и макроскопическими размерами, построенный (структурированный) из отдельных нанообъектов.

Нанотехнология – совокупность методов, позволяющих целенаправленно создавать нанообъекты с заранее заданными составом, размерами и структурой.

Сборка «сверху-вниз» – классический принцип построения наноматериалов, заключающийся в «измельчении» или удалении лишних частей обычных макроскопических материалов.

Сборка «снизу-вверх» – принцип построения наноматериалов, заключающийся в конструировании наноматериалов из более малых блоков (атомов и молекул).

Сегнетоэлектрик – вещество, в котором в отсутствие внешнего электрического поля могут реализовываться два или более направлений спонтанной поляризации. Направление поляризации может быть изменено (переключено) на противоположное под действием внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрические свойства проявляются в ограниченном температурном интервале ниже температуры фазового перехода в сегнетоэлектрическое состояние.

Силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика – разновидность контактной АСМ, основанная на детектировании амплитуды и фазы локальных механических колебаний поверхности, индуцированных приложением переменного электрического напряжения с помощью зонда СЗМ вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта. Активно используется для визуализации доменной структуры сегнетоэлектриков.

Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия – разновидность СЗМ, основана на детектировании ближнепольного оптического излучения, возникающего в результате

взаимодействия источника света нанометровых размеров с поверхностью материала.

Сканирующая емкостная микроскопия – разновидность двухпроходной методики полуконтактной или бесконтактной АСМ; позволяет проводить измерения изменений емкости зонд-образец в диэлектрических и полупроводниковых материалах с целью определения пространственного распределения концентрации и типа носителей заряда в материале.

Сканирующая зондовая литография – совокупность СЗМ методик, позволяющих выполнять прецизионное воздействие на поверхность образца по заданному растровому или векторному шаблону.

Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия – оптическая методика, основанная на конфокальном измерении интенсивности проходящего или отраженного света при трехмерном сканировании среды сфокусированным лазерным пучком.

Сканирующая микроскопия нелинейной диэлектрической проницаемости – разновидность контактной АСМ, позволяющая измерять пространственное распределение величин компонент тензора нелинейной диэлектрической проницаемости.

Сканирующая микроскопия сопротивления растекания – разновидность контактной АСМ, основанная на детектировании малых по величине локальных токов, протекающих в неоднородной диэлектрической среде при приложении постоянной разности потенциалов между зондом СЗМ и однородным нижним электродом образца.

Сканирующая туннельная спектроскопия – разновидность СЗМ методики, основанная на измерении вольт-амперных характеристик в режиме СТМ.

Сканер (сканирующий элемент) – один из основных компонентов СЗМ, отвечающий за прецизионное перемещение зондового датчика относительно исследуемой поверхности во всех трех пространственных направлениях.

Углеродная нанотрубка – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров; состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчиваются обычно полусферической головкой.

Электрическая силовая микроскопия – разновидность двухпроходной методики полуконтактной или бесконтактной АСМ, основанная на детектировании электрического взаимодействия зонда, имеющего токопроводящее покрытие, при приложении постоянной разности

потенциалов между зондом и нижним электродом образца.

Фуллерен – молекулярные соединения углерода, представляющие собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода, образующих пятиугольные и шестиугольные кольца на поверхности молекул.

Хиральность – свойство *углеродных нанотрубок*, обусловленное различными направлениями свертки нанотрубок из графитовых плоскостей; характеризуется индексами хиральности.