

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

Введение в нанотехнологии

Методические указания

Подпись руководителя ИОНЦ
Дата

**Екатеринбург
2007**

Методические указания по изучению специальной дисциплины «Введение в нанотехнологии» 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 «Введение в нанотехнологии» рассчитан на студентов 3-го курса, обучающихся на физическом и химическом факультетах Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Семестр: 5-ый.

Общая трудоемкость дисциплины (ч): 50.

В том числе:

лекции: 30;

семинары: 6.

Составители:

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

И.С. Батурин, кандидат физ.-мат. наук (Уральский центр коллективного пользования «Сканирующая зондовая микроскопия» УрГУ).

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для студентов, изучающих специальную дисциплину «Введение в нанотехнологии», и призваны помочь успешному освоению материала курса и достижению основной его цели – ознакомления с новейшими достижениями и направлениями развития в современной междисциплинарной области практических научных знаний – нанотехнологиях.

В результате изучения дисциплины студенты должны уметь свободно ориентироваться в основных направлениях развития нанотехнологий; понимать суть эффектов, определяющих особые физико-химические свойства наноматериалов; знать основные технологические процессы, используемые при получении наноматериалов; иметь представления о возможностях современной приборно-метрологической базы для исследования материалов с нанометровым пространственным разрешением.

В ходе курса будет проведено несколько семинаров, на которых студенты смогут сделать доклады по новейшим достижениям нанотехнологий и обсудить наиболее актуальные проблемы нанотехнологий. 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 аспектам нанотехнологий. К числу рекомендуемых сайтов можно отнести следующие:

Интернет-энциклопедия: <http://ru.wikipedia.org> (статья «Нанотехнология»)

Нанотехнологический портал: <http://www.nanonewsnet.ru>

Портал Наноиндекс: <http://www.nanoindex.ru>

Нанотехнологическое сообщество Нанометр: <http://www.nanometer.ru>

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

Сообщество Nano.Tech: <http://www.nanotech.ru>

Национальный информационно-аналитический центр "Нанотехнологии и наноматериалы": <http://www.iasnano.ru>

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

СОСТАВ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Учебно-методический комплекс дисциплины «Введение в нанотехнологии» включает в себя программу дисциплины, данные методические указания, вопросы для самоконтроля, вопросы к зачету и набор презентаций, которые будут использоваться при чтении лекций.

Презентации также могут использоваться студентами в индивидуальном порядке при подготовке к занятиям и зачету.

РАЗДЕЛ 1. НАНОМАТЕРИАЛЫ

Тема 1. Основные понятия и определения

Первая тема знакомит обучающихся с такими основными понятиями курса, как нанонаука, нанотехнология и наноинженерия. Дано определение места нанообъектов на общей шкале размеров и их классификация в терминах пространственной размерности. В качестве исторической справки представлены основные этапы развития нанотехнологий и выделены персоналии, сыгравшие наиболее значимые роли в становлении этой междисциплинарной области практических знаний. В рамках темы представлены примеры наиболее значимых для развития нанотехнологий наноматериалов, а также примеры различных наноустройств.

В ходе изучения темы студенты должны уяснить основные причины, обуславливающие особое поведение объектов наномира, познакомиться с подходами «сверху-вниз» и «снизу-вверх» к получению наноматериалов, понятиями авто- и самосборки. Следует внимательно разобрать примеры простейших нанотехнологических процессов: нанопечатная литография, литографически индуцированная самосборка.

Тема 2. Углеродные наноструктуры

2.1. Фуллерены

Первая часть темы посвящена краткому ознакомлению с основными физико-химическими свойствами углерода, особенностями углеродной связи и гибридизацией электронных орбиталей. Рассматриваются основные классические аллотропные формы углерода: графит и алмаз. Данные знания необходимы для понимания дальнейшего материала, посвященного изучению углеродных наноструктур.

Далее рассматривается история открытия фуллеренов в контексте астрофизических исследований, послуживших толчком к этому открытию. Подробно разбирается структура фуллеренов, как с точки зрения геометрии, так и с позиций особенностей углеродных связей. Особое внимание следует уделить формуле Эйлера и понять общую закономерность структуры фуллеренов. При рассмотрении методов синтеза фуллеренов необходимо обратить внимание на роль инертных газов в соответствующих методиках.

При рассмотрении основных физико-химических свойств фуллеренов необходимо принять к сведению особенности термической стабильности и окисления фуллеренов. Данная информация важна для изучения следующей темы, посвященной углеродным нанотрубкам. При изучении примеров фуллероидных соединений на основе C_{60} необходимо уяснить

функциональное назначение соответствующих химических модификаций элементами Н, F, Cl и OH. Разберите соответствующие применения таких фуллероидов.

Заключительная часть темы посвящена рассмотрению свойств кристаллических модификаций фуллеренов – фуллеритам и фуллеридам, а также эндодральным структурам на основе фуллеренов. Студент должен четко различать между собой эти классы структур. Следует также изучить особенности фазовых переходов в фуллеритах, условия наблюдения проводимости и сверхпроводимости в фуллеридах. В заключении кратко рассматриваются основные потенциальные применения фуллеренов.

2.2. Нанотрубки

Рассмотрение структуры углеродных нанотрубок разделено на две части, посвященные одностенным и многослойным нанотрубкам соответственно. В обоих случаях необходимо проследить связь между строением нанотрубок и структурой графита, сравнить соответствующие межатомные расстояния внутри одного слоя и между слоями, на основе чего можно сделать первичные предположения о методах получения нанотрубок. При изучении структуры одностенных нанотрубок следует тщательно разобрать понятие хиральности и уметь свободно ориентироваться в индексах хиральности, характеризующих геометрию и, как следствие, основные физические свойства нанотрубок. Обучающийся должен легко отличать хиральные нанотрубки от нанотрубок типа гофр и зигзаг. Рассмотрение структуры многослойных нанотрубок включает в себя изучение структур типа свиток, коаксиально вложенных нанотрубок и канатов из нанотрубок. Особое внимание следует уделить структуре дефектов на поверхности нанотрубок и их влиянию на форму и физические свойства нанотрубок.

Далее следует достаточно подробно рассмотреть все основные методы синтеза нанотрубок: методы дугового разряда, лазерного испарения и осаждения из газовой фазы. Изучите возможности методов по синтезу однослойных и многослойных нанотрубок, литографическому определению точек роста. Рассмотрите основные стадии очистки нанотрубок.

Изучите основные механические, электрические и магнитные свойства нанотрубок. В каждом случае сформулируйте особенности структуры нанотрубок, обуславливающие обсуждаемые свойства. Подробно разберите применения нанотрубок, рассматриваемые в рамках темы: нанотрубки-контейнеры, полупроводниковые электронные элементы на основе нанотрубок, элементы фотоники и наноэлектромеханические элементы, и др.

В заключении темы приводятся краткие сведения о других углеродных наноструктурах, таких как углеродные нанолуковицы, а также о нанотрубках других материалов: дисульфиде вольфрама и хризотиле.

Тема 3. Консолидированные наноматериалы

3.1. Нанокристаллические материалы

Рассмотрение темы нанокристаллических материалов начинается с классификации твердых тел по их агрегатному состоянию. В этом контексте нанокристаллическое состояние рассмотрено как переход от аморфного состояния к поликристаллическому. При изучении этой темы особое внимание следует уделить особенностям структуры зерен и межзеренного вещества в нанокристаллическом состоянии, определяющих уникальные свойства этих материалов.

Внимательно разберите основные методы получения нанокристаллических материалов: осаждение из газовой и жидкой фазы, быстрое отвердевание из расплава, интенсивные пластические деформации, рекристаллизация из аморфного состояния. В результате изучения этой темы обучающийся должен иметь представление о преимуществах и недостатках различных методик, уметь оценить степень пористости продуктов методик и наличие в них излишних механических напряжений.

При изучении основных физических свойств нанокристаллических материалов и связанных с ними повышенной механической прочности и пластичности, особыми диффузионными свойствами следует выделять те особенности структуры этих материалов, которые ответственны за соответствующее поведение. Внимательно изучите вопросы, связанные с метастабильностью нанокристаллического состояния и явлению рекристаллизации. Рассмотрите основные применения нанокристаллических материалов.

3.2. Нанокompозиты, нанопористые материалы и магнитные наночастицы

Данная тема содержит краткие сведения о свойствах различных нанокompозитов, нанопористых материалов и магнитных наночастиц. В начале темы рассмотрена технология изготовления цветных витражей, как пример нанотехнологического процесса, известного с древних времен. Приведена краткая сводка других, актуальных в настоящее время, примеров использования нанокompозитов, иллюстрирующих особое поведение, обусловленное малостью частиц, составляющих эти материалы.

Далее рассматриваются методы синтеза молекулярных сит (субнанопористых и нанопористых материалов) на основе цеолитов. Эти материалы играют чрезвычайно важную роль в современной химической промышленности и, в частности, в процессах переработки нефтепродуктов. В качестве альтернативного примера рассматриваются методы изготовления и свойства пористого кремния, обладающего замечательными оптическими свойствами.

Наибольшее внимание в теме уделено магнитным наноматериалам. Рассмотрено явление суперпарамагнетизма, подменяющее собой ферромагнитные свойства частиц нанометровых размеров. Обучающийся должен уяснить суть парамагнетизма, понимать и уметь интерпретировать зависимость величины магнитной коэрцитивной силы от диаметра ферромагнитных частиц. В рамках темы рассмотрены также свойства ферромагнитной жидкости, пред-

ставляющей собой коллоидный раствор из магнитных наночастиц. Кратко рассмотрены вопросы, связанные с магнитными нанокомпозитами, проявляющими эффект гигантского магнитосопротивления.

Тема 4. Молекулярные нанотехнологии

Тема посвящена одному из наиболее ярких направлений нанотехнологий – молекулярным нанотехнологиям. Рассмотрено понятие механосинтеза, сформулированы основные подходы, позволяющие манипулировать веществом на уровне атомов и молекул, введено важное понятие ассемблера.

Большое внимание уделено рассмотрению процесса биосинтеза белка, как примера работы природных ассемблеров. Достаточно подробно изучается структура основных биологических объектов (аминокислоты, пептиды, ДНК, РНК), задействованных в биосинтезе. Обучающийся должен свободно владеть этой информацией, а также уметь пошагово представить стадии транскрипции и трансляции, реализующие синтез белка. В теме также обсуждена возможность создания искусственных биомашин, работающих аналогично биосинтезу белка, указаны основные недостатки таких машин.

В качестве примера использования свойств ДНК рассматривается устройство и принцип действия ДНК чипов. Продемонстрированы возможности таких чипов при проведении экспериментов по экспрессии генов, а также при анализе компонентов продуктов питания. Приведена схема изготовления ДНК чипов.

Как пример работы простейших искусственных молекулярных машин рассмотрены супрамолекулярные системы: псевдоротаханы, ротаханы и катенаны. Продемонстрированы способы управления такими машинами. Сформулированы основные проблемы практического использования супрамолекулярных систем и указаны перспективные направления работы по решению этих проблем.

В заключении темы рассмотрена концепция нанофабрик, призванных автоматизировать процесс сборки любых материалов и устройств с атомарной точностью. Детально рассмотрена модель нанофабрики Криса Феникса, фабрикатеры на базе платформ Стюарта и Меркле. Приведены оценки эффективности работы таких нанофабрик, энергопотребление, длительность цикла репликации.

Тема 5. Нанофотоника

Тема посвящена направлению нанотехнологий, имеющего большое практическое значение для телекоммуникаций и лазерной техники. В начале темы дается определение термина «Нанофотоника». При изучении данной темы необходимо обратить внимание, что нанофотоника охватывает широкий спектр вопросов, связанных с взаимодействием света с веществом в нанометровом масштабе расстояний и является междисциплинарной наукой. Нанофо-

тоника делится на три больших раздела:

- Локализация света в областях нанометрового размера;
- Взаимодействие света с наноструктурированными материалами;
- Фотопроцессы на нанометровых расстояниях, применение света в качестве инструмента нанотехнологий.

Соответственно, план работы по нанофотонике делится на три части.

Первая часть посвящена изучению локализации света в пространстве. Приводится классификация типов нанолокализации света. Рассмотрен вопрос о затухающих волнах, возникающих в областях, где распространение света энергетически запрещено. В качестве примера следует рассмотреть эффект полного внутреннего отражения. Наличие затухающих волн является одним из ключевых моментов всей темы и активно используется в дальнейшем.

Изучение нанолокализации света в пространстве продолжается рассмотрение поверхностных плазмонов, представляющих собой поверхностные волны (коллективные движения электронов проводимости металла) распространяющиеся вдоль границы металл-диэлектрик. Процесс передачи энергии оптической волны в подсистему поверхностных плазмонов называется поверхностным плазмонным резонансом. Следует отметить, что прямая генерация поверхностных плазмонов за счет оптического излучения невозможна, т.к. свет с необходимыми длинами волн не может распространяться ни в одном из контактирующих материалов. Поэтому для наблюдения эффектов, связанных с поверхностными плазмонами применяются специальные конфигурации эксперимента, использующие наличие затухающих волн.

Третий тип нанолокализации света связан с наличием области ближнего поля вблизи неоднородностей вещества нанометрового размера. Различается апертурная и безапертурная локализация света. В связи с данной темой упоминается сканирующий оптический микроскоп ближнего поля, который подробнее рассмотрен в части, посвященной методикам.

Вторая часть темы посвящена оптическим наноматериалам, то есть веществам, в которых наличие неоднородностей наноразмера приводит к существенному изменению оптических свойств. Рассматривается квантовая локализация электронов и оптические свойства нанометровых квантовых структур, металлические наночастицы и их оптические свойства (плазмоника). Рассмотрено понятие фотонного кристалла, приведены природные примеры фотонных кристаллов и их классификация. Основной оптической особенностью фотонных кристаллов является наличие запрещенных частот и направлений распространения света, что является прямой аналогией с электронной структурой полупроводников и оправдывает название «фотонные кристаллы». Кратко рассмотрены методы создания фотонных кристаллов и их возможные применения. Среди нанокомпозитов выделяется два принципиально отличающихся типа: нанокомпозиты с размерами включений и расстояний между ними существ-

венно меньше длины волны, и нанокомпозиты, в которых эти размеры сравнимы с длиной волны. Нанокомпозиты первого типа являются средами с эффективным показателем преломления и практически не рассеивают свет, в то время, как нанокомпозиты второго типа являются эффективными рассеивающими средами с некоторыми аномальными свойствами.

Нанопотоника как инструмент нанотехнологии рассматривается кратко за неимением возможности и в связи с тем, что в лекции, посвященной литографии методы оптической нанолитография рассмотрены более подробно.

Тема 6. Нанотехнологии в сегнетоэлектриках

В качестве примера развития идей нанотехнологий в применении к конкретной области науки приведены основные достижения нанонауки в сегнетоэлектричестве. В начале темы даны общие сведения о сегнетоэлектриках, их доменной структуре и процессе переключения поляризации. Раскрыты основные направления развития нанотехнологий в сегнетоэлектриках: создание наноструктур из сегнетоэлектрических материалов и нанодоменная инженерия. Рассмотрены основные применения доменной инженерии: построение нелинейно-оптических устройств и разработка методов записи информации со сверхвысокой плотностью. Особое внимание уделено роли сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в разработке методов создания доменов нанометровых размеров. В качестве примера реализации идеи самосборки представлены оригинальные результаты по самоорганизованному формированию квазирегулярных доменных наноструктур под воздействием импульсного лазерного излучения. Рассмотрен механизм коррелированного зародышеобразования, ответственный за наблюдаемое самоорганизованное поведение.

Тема 7. Проблемы экологии и этики в развитии нанотехнологий

Тема посвящена обсуждению новых возможностей и потенциальных рисков развития нанотехнологий для экосферы Земли в целом и человечества в частности. Наиболее внимательно следует рассмотреть вопросы, связанные с токсичностью наночастиц и загрязнением окружающей среды на стадиях производства, эксплуатации и утилизации наноматериалов. Необходимо обратить внимание на две основные причины повышенной токсичности наночастиц: высокой подвижности и высокой реакционной способности по сравнению с частицами больших размеров. Обучающиеся должны также уметь приводить примеры в защиту развития нанотехнологий, как методов улучшения экологической обстановки.

Отдельно рассматриваются вопросы, связанные с потенциальными последствиями исследований в области нанотехнологий для развивающихся стран. С одной стороны, нанотехнологии призваны существенно удешевить технологии производства энергии, чистой питьевой воды, вычислительных средств, средств связи, бытовой техники и др., поднимая таким образом уровень жизни. С другой стороны, с неизбежностью, развивающиеся страны,

не имеющие возможности развивать нанотехнологии самостоятельно, оказываются в еще большей зависимости от развитых стран. Необходимо уделить особое внимание разбору данного противоречия, проанализировать возможные варианты развития ситуации и возможные пути решения. Следует также учитывать аспекты, связанные с развитием военных нанотехнологий: понижение уязвимости боевых единиц с одной стороны и усилением поражающего действия новых видов вооружения на основе нанотехнологий с другой.

В заключении следует рассмотреть этические стороны вопроса, связанного с развитием наномедицины и потенциальной возможности реализации в будущем «программы сверхчеловека», меняющей, по сути, природу человека и делающей ее зависимой от различных достижений нанотехнологий.

РАЗДЕЛ 2. ПРИБОРНО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Тема 8. Основные технологические процессы

8.1. Чистые помещения

Чистые помещения являются необходимым условием развития многих отраслей науки и техники. Немыслимы без них и нанотехнологии. Поэтому в данном курсе выделена тема, посвященная знакомству с технологиями чистоты. Согласно стандартам термин чистое помещение имеет вполне четкую трактовку: «Помещение, в котором контролируется счетная концентрация аэрозольных частиц и которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения, и в котором, при необходимости, контролируются другие параметры, например, температура, влажность и давление».

В данной теме невозможно рассмотреть все аспекты технологии чистых помещений подробно, поэтому были выбраны тему, наиболее важные для общего понимания принципов организации чистых помещений и принципов работы в них в качестве пользователя.

В настоящее время существует группа международных стандартов по чистым помещениям ISO 14644 и их аутентичный перевод, принятый в качестве стандарта в Российской Федерации (ГОСТ ИСО 14644).

Класс чистоты помещения определяется по содержанию аэрозольных частиц размерами 0.1 – 5 мкм в воздухе согласно методикам, прописанным в стандартах. Для достижения необходимого класса чистоты требуется четко представлять различие и сферы применения турбулентно-вентилируемых чистых помещений и чистых помещений с однонаправленным движением воздуха.

Следует обратить внимание на то, что в настоящее время достаточно активно применяются подходы к снижению затрат на создание и эксплуатацию чистых помещений. Важную

роль в этом играет разумное применение мини-зон и изоляторов.

В презентациях приведены данные о высокоэффективных фильтрах для очистки воздуха, методы определения концентрации аэрозольных частиц. В заключении приводятся основы эксплуатации чистых помещений.

8.2. От микро- к нанолитографии.

Микролитография, а в последнее время и нанолитография, являются чрезвычайно важными технологическими процессами, на которых базируется вся микроэлектроника, интегральная оптика и другие не менее важные промышленные и научные направления. Поэтому данной теме следует уделить внимание и постараться уяснить основные моменты и принципы, на которых базируется микролитография. Важно отметить, что как технологически разработанное направление литография является чрезвычайно обширной областью, поэтому в данном курсе приводятся лишь основные моменты. При наличии потребности в более глубоких знаниях студенту следует обратиться к специализированной литературе, приведенной в списке к данному курсу и ресурсам Интернет (для отслеживания последних достижений в этой области).

К качеству основной темы рассмотрен технологический процесс фотолитографии, как наиболее развитого и исторически появившегося первым. Особое внимание следует обратить на вопросы, касающиеся предельного разрешения методов фотолитографии и факторов, влияющих на него. Следует отметить, что кроме физического дифракционного предела в выражение для предельной разрешающей способности входит также параметр, зависящий от конкретной реализации методики. В сегодняшнем состоянии практического применения литографии в микроэлектронике очень много сделано для того, чтобы насколько это возможно уменьшить этот коэффициент. Для этого применяются различные теоретические методы адаптации фотошаблонов для корректировки искажений и сложнейшие оптические системы, построенные с привлечением методов Фурье-оптики.

Литография в области глубокого УФ, рентгеновского и электронная рассматривается по аналогии.

Коротко рассмотрены основные направления нанолитографии. Следует отметить, что на сегодняшний день фотолитография, уже фактически является нанолитографией. Однако в связи с появлением методов типа ноноимпринт-литографии на них обращено большое внимание в науке и промышленности и такие методы рассматриваются в качестве достойных конкурентов фотолитографии для перехода к характерным размерам элементов в 30 нм и менее.

Тема 9. Электронная микроскопия

Электронная микроскопия является, наравне со сканирующей зондовой микроскопией,

одним из основных методов анализа наночастиц и наноматериалов. Следует отметить, что методы получения контраста и физические основы электронной микроскопии принципиально отличаются от сканирующей зондовой, что позволяет существенно расширить круг анализируемых параметров.

После рассмотрения основных компонент электронного микроскопа следует основное внимание обратить на различие просвечивающего и сканирующего электронных микроскопов. Понимания темы на данном уровне достаточно для того, чтобы в дальнейшем при необходимости ориентироваться в огромном количестве методик, которые разработаны на базе электронных микроскопов.

Основные отличия:

Электронный просвечивающий микроскоп – работает в основном на просвет, соответственно анализируются исходные электроны, прошедшие через образец. Изображение объекта. Как правило строится непосредственным проецированием прошедшего пучка на экран. Кроме того, в просвечивающем микроскопе достаточно часто применяются дифракционные методы структурных исследований.

Сканирующий зондовый микроскоп построен на принципе сканирования сфокусированным электронным пучком по образцу и построения растрового изображения, показывающего распределение того, или иного сигнала, поступающего с установленного детектора. Прошедшие насквозь электроны в анализе не участвуют. Существует достаточно большое количество методик детекции различных сигналов, например: интенсивность вторичных электронов, интенсивность обратнорассеянных электронов, Оже электронов и характеристического рентгеновского излучения.

Следует изучить вопрос о разрешении различных типов электронных микроскопов для того, чтобы иметь ясное представление о возможностях, которые они предоставляют, в частности, в сравнении с другими типами микроскопов.

Тема 10. Сканирующая зондовая микроскопия

10.1. Основы сканирующей зондовой микроскопии

История развития сканирующей зондовой микроскопии. Устройство и принцип действия сканирующего туннельного микроскопа: туннельный сенсор, режимы постоянного тока и постоянной высоты. Ограничения сканирующей туннельной микроскопии.

Устройство и принцип действия сканирующего атомно-силового микроскопа: оптический силовой сенсор, силы межатомного взаимодействия, диапазоны сил при работе в контактном и бесконтактном режимах. Назначение и принципы работы обратной связи.

Основные типы сканеров, применяемых в сканирующем зондовом микроскопе. Используемые свойства пьезокерамики, триподные, трубчатые и гибридные сканеры. Основные ти-

пы кантилеверов, используемых в контактном и бесконтактном режимах атомно-силовой микроскопии. Параметры, влияющие на качество получаемых изображений.

Исследование механических свойств материалов. Микроскопия поперечных сил (коэффициент трения). Микроскопия модуляции сил (микротвердость, адгезия).

Исследование магнитных свойств материалов. Микроскопия магнитных сил. Принцип работы, проблема топографических артефактов, качество получаемых изображений, требования к зондам.

Исследование электрических свойств материалов. Микроскопия электростатических сил, микроскопия поверхностного потенциала, сканирующая емкостная микроскопия, сканирующая импедансная микроскопия, силовая микроскопия пьезоотклика.

10.2. Исследование оптических свойств материалов с помощью сканирующей зондовой микроскопии

Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия. Принцип действия и реализация. Горизонтальное и вертикальное разрешение методики. Сравнение с обычной оптической микроскопией.

Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля. Преодоление оптического дифракционного предела, принцип действия, используемые типы зондов, основные режимы работы.

ТЕМЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Работа Эрика Дрекслера «Машины созидания» – обзор основных парадигм. Возражения Ричарда Смолли о возможности механосинтеза.

2. Квантовые точки: особенности энергетического спектра, аналогия со структурой атома. Методы изготовления и возможные применения.

3. Нанoeлектроника: нанопроводники и полупроводники, одноэлектронные устройства, молекулярные логические устройства.

4. Эффект гигантского магнитосопротивления. Спинтроника: основные идеи и применения. Эффект Джозефсона.

5. Квантовые компьютеры: идеология, алгоритмы, возможные пути технической реализации.

6. Микро- и нанoeлектромеханические системы. Основные принципы построения. Наноманипуляторы, нанонасосы, нанороботы и другие системы.

7. Использование наноматериалов и наноустройств в медицине и биологии: текущее состояние и перспективы.