

разработать национальную стратегию развития нанотехнологии, организовать эффективное сотрудничество промышленных, государственных и научных ведомств и организаций в данной сфере.

Страны Западной Европы начали проводить работы в области нанотехнологии в рамках соответствующих национальных программ. В ФРГ нанотехнологические изыскания поддерживаются в основном Министерством образования, науки, исследований и технологий. В Англии руководство этим направлением осуществляет Совет по физико-техническим исследованиям, а также Национальная физическая лаборатория. Во Франции стратегию развития нанотехнологии определяет Национальный центр научных исследований.

Все больше внимания нанотехнологиям уделяется в Китае, Южной Корее, ряде других государств. Нанотехнологические изыскания начали осуществляться и в странах СНГ, в частности в России и Украине, как правило, в ходе проведения государственных научных программ. В Беларуси подобные работы идут в рамках ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии», принятой на 2006–2010 гг. Она является продолжением предыдущей государственной программы ориентированных фундаментальных исследований с таким же названием, которая выполнялась в 2003–2005 гг.

Сегодня трудно предвидеть все социальные последствия внедрения нанотехнологии, так же как в середине XX в. трудно было предсказать, что повлекут за собой разработки в области электроники и информатики. Предполагается, что в ближайшие годы бюджетные ассигнования ведущих индустриальных стран на изыскания в области нанотехнологии существенно возрастут. При этом намеченные исследования будут нацелены на решение ряда конкретных задач: создание сверхминиатюрных запоминающих устройств с мультитерабитовым объемом памяти; повышение быстродействия компьютеров в миллион раз;

создание сверхпрочных материалов и на их основе — новых транспортных средств; выпуск генетических и медицинских препаратов для диагностики и лечения раковых заболеваний, СПИДа; разработка новых материалов и процессов для защиты окружающей среды и др.

О большом внимании, которое уделяет мировая научная общественность проблемам развития нанотехнологии, свидетельствует присуждение в 2007 г. Нобелевской премии по физике за открытие и исследование одного из необычных явлений наномира — эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС). Премии удостоены француз Альберт Ферг и немец Петер Грюнберг, независимо друг от друга открывшие эффект ГМС в 1988 г. Магнетосопротивление — это изменение электрического сопротивления проводника, вызванное действием внешнего магнитного поля. ГМС, в отличие от классического магнетосопротивления, проявляется в существенно более резком возрастании электросопротивления во внешнем магнитном поле (на десятки процентов). Физический механизм ГМС базируется на зонной теории твердого тела, в частности на спинзависимых транспортных явлениях. Эффект наблюдается в магнитных нанопленках и нанопроволоках, которые благодаря ему можно использовать для создания высокочувствительных датчиков магнитного поля, способных реагировать на ничтожно малое его изменение. Их применение существенно изменяет промышленное производство устройств магнитной записи на жесткие диски и другие магнитные носители информации.

Приведенные факты свидетельствуют, что человечество вступило в эру активного освоения нанотехнологии. Уже достигнутые результаты впечатляют, а впереди еще более интригующие перспективы.

Ж-л «Наука и инновации» №12 (70) 2008

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОДИАГНОСТИКА. Некоторые результаты исследований в 2008 году

С.А. Чижик

Президиум Национальной академии наук Беларуси

Разработки в области нанотехнологий, возможно, определяют развитие человечества уже на ближайшее будущее. Высокоразвитыми странами осознана ключевая роль нанотехнологий в разви-

тии экономики, что привело к разработке широкомасштабных программ с государственной поддержкой. Исследования в области нанотехнологий носят междисциплинарный научный характер

и используют знания, накопленные в физике, химии, биологии. Результаты, полученные при разработке нанотехнологий, являются универсальными и могут быть применены в различных отраслях науки и техники: машиностроение, материаловедение, электроника, оптика медицина, оборона и др. Разработки в области нанотехнологий способствуют повышению общего технологического уровня промышленности.

В Республике Беларусь исследования в области наноматериалов проводятся в рамках Государственной программы фундаментальных исследований «Наноматериалы и нанотехнологий» (2003–2010 гг.). В выполнении заданий программы участвуют десятки научных учреждений Национальной академии наук Беларуси (НАН Беларуси).

Наноструктурные материалы

Основными исследованиями в области наноструктурных материалов являются: исследования и диагностика материалов, сред и систем с низкоразмерным структурированием; синтез, изучение структуры, физико-химических, электрофизических и магнитных свойств наноструктурированных материалов различного назначения; развитие методов и технологических основ создания и разработки новых углеродных, сверхтвердых, тугоплавких, магнитных, композиционных наноматериалов в виде керамических, полимерных, слоистых и пленочных структур и изделий на их основе, создание новых адсорбентов, катализаторов, ионо-обменников, эмульсий, имплантатов, фильтров, мембран, сенсоров; разработка и исследование устройств и систем наноэлектроники на основе наноструктурированных кремния и оксида алюминия, а также органических и неорганических молекул (Институт физики твердого тела и полупроводников, Институт физико-органической химии, Институт механики металлополимерных систем).

Важными задачами для институтов материаловедческой направленности являются исследования фундаментальных закономерностей формирования наночастиц и нанотрубок, фуллеренов и процессов структурообразования пленочных, слоистых, объемных наноматериалов различного класса в условиях высокоэнергетических воздействий — дугового разряда, лазерного излучения, высоких динамических и статических давлений, механического легирования, а также полученных путем электрохимического осаждения, плазмохимического и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза; закономерностей работы наноприборов и систем, созданных на основе наноструктурирован-

ных кремния и оксида алюминия, а также органических и неорганических молекул.

Исследования в области наноструктурных материалов на базе нанопорошков проводятся в Институте порошковой металлургии ПАН Беларуси. Разработки Института включают:

- получение нанопорошков для композиционных материалов золь-гель технологией, высокоэнергетическим диспергированием,

- самораспространяющимся высокотемпературным синтезом с механоактивацией;

- консолидация и спекание композиционных наноматериалов в условиях импульсного воздействия, самораспространяющимся высокотемпературным синтезом;

- получение композиционных наноматериалов с анизотропной структурой, в т. ч. керамических многослойных мембран для стерилизации и ультратонкой очистки биологических сред, растворов медпрепаратов, катализаторов;

- изучение и сертификация свойств нанопорошков (грансостав, удельная поверхность, пикнометрическая плотность и т. п.), структуры и свойств композиционных наноматериалов;

- разработка процессов напыления нанопорошков;

- изучение свойств и технологии получения трехмерных фотонных кристаллов на основе монодисперсных керамических порошков.

Разработаны и успешно внедряются: технология получения наноструктурированного порошка гидроксида алюминия, используемого для изготовления корундовой керамики и нанокристаллической композиционной фольги, технология изготовления нейтрализатора отработавших газов, технология структурирования материалов введением наночастиц при ударно-волновом нагружении, технология изготовления ячеистых катализаторов, технология восстановления деталей газотермическим напылением с использованием ультрадисперсных алмазов, технологии компактирования нанопорошков статическим прессованием, в том числе при высокой температуре (1300-1500 °С) и давлении (4 ГПа), импульсным (гидродинамическим) прессованием, динамическим прессованием.

Проведенные институтом исследования стали основой для изготовления опытных изделий из нанопорошков керамических фильтрующих материалов с градиентной иерархической макро-, микро- нанопористой структурой, трехмерных нанопористых периодических структур (фотонные кристаллы), керамических мембранных фильтров

с прямолинейными поровыми каналами для обессоливания воды и ультрафильтрации жидкостей.

Большой объем исследований проводится по разработке методов и оборудования для получения углеродных нанотрубок, в том числе в промышленных объемах (Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, НМТИ). Ведется активный поиск путей их использования в новых и традиционных материалах (резины, краски, бетоны и др.), создания на базе единичных нанотрубок зондовых манипуляторов для атомно-силовых микроскопов.

Мономолекулярные пленки

В Институте химии новых материалов НАН Беларуси разрабатываются методы и устройства для формирования тонкопленочных покрытий с начальными мономолекулярными толщинами от 1 нм и выше. В частности, разработан метод модификации поверхности ультратонкими пленками за счет горизонтального осаждения монослоев органических и металлорганических соединений с водной поверхности на твердую подложку. Совместно с учеными Института тепло- и массообмена НАН Беларуси и специалистами ОДО «Микротестмашины» создана полностью автоматизированная экспериментальная установка, по существу — нанофабрика (рис. 1), которая позволяет формировать мультимолекулярные слои и пленки управляя процессами самоорганизации вещества, совмещая перенос его на подложку как из раствора, и так и по технологии Ленгмюр-Блоджетт (ЛБ). Установка (ЛБ ванна) позволяет формировать пленки традиционным вертикальным методом ЛБ и методом горизонтального осаждения (ГО).

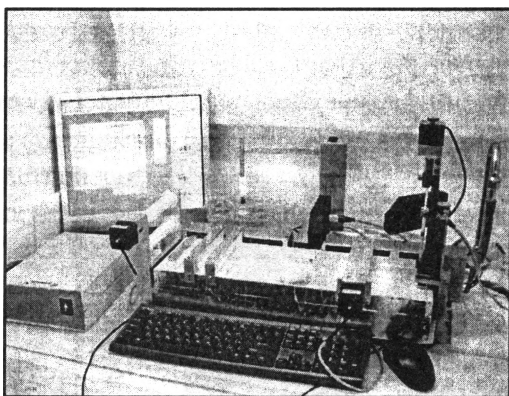


Рис. 1. Экспериментальный комплекс для модификации поверхности на нанометровом уровне за счет процессов самоорганизации вещества из раствора и по технологии Ленгмюр-Блоджетт

Экспериментальный комплекс для формирования на твердой поверхности моно- и мультимолекулярных композиционных покрытий различного

функционального назначения позволяет модифицировать поверхность изменяя ее свойства (степень гидрофильности, оптические, электрические и т.д.), создавать изолирующие и проводящие ультратонкие пленки, туннельные диэлектрики, пассивирующие и защитные покрытия, элементы молекулярной электроники как на твердой поверхности, так и на гибкой полимерной основе. Комплекс построен по модульному принципу и помимо ванны ЛБ, оснащенной датчиками поверхностного натяжения и дозаторами, содержит модуль послойного осаждения. В автоматическом режиме возможно погружение на заданное время (и извлечение) подложки с заданной скоростью и выбором любой из 20 рабочих емкостей с различными веществами в жидком состоянии. Реализовано объединение методов выделения, когда после обработки подложки в растворе, возможно последующее выделение пленки методом ЛБ с различным чередованием слоев. Модуль ванны ЛБ вращающимся барьером и лентопротяжным механизмом, что позволяет выделять слои амфифильных полимеров и блоксополимеров на гибкую полимерную основу.

В представленной установке реализованы основные способы формирования мономолекулярных покрытий, используя поверхностно-активные вещества, полиэлектролиты на основе водорастворимых полимеров, бифункциональные тиолы и т.д. В том числе возможно проведение работ, связанных с иммобилизацией биомолекул на твердой поверхности, разработка подходов формирования композиционных структур с заданными свойствами (износоустойчивость, проводимость, намагниченность) и функциями (запись информации, магнитная сепарация и т.д.) для применения в медицине (биосенсоры, биомаркеры, микрокапсулы), трибологии (защитные покрытия). На базе представленного экспериментального комплекса (рис. 1) можно выполнять молекулярную печать на гибкой полимерной подложке большой протяженности. Накопленный опыт и разработанные установки можно использовать при создании новых нанослоистых покрытий и устройств — нанобиосенсоров, биомаркеров, тонкопористых материалов, биосовместимых покрытий, биокапсул и т.д.

Методы нанодиагностики на основе сканирующих зондовых микроскопов

Диагностика (нанодиагностика) структур и физико-механических свойств объектов, создаваемых с помощью нанотехнологий, является обязательным условием для их успешного развития.

Проектирование микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС), создание материаловедческих наноструктур требует оценки локальных механических свойств тонких пленок и материалов в нанобъемах. Поведение материалов в сверхмалых объемах (наноразмерные кластеры, тонкие нанопокрyтия, нонокомпозиты) существенно отличается от привычного поведения конструкционных материалов в макрообъемах. Значительными возможностями в области нанодиагностики обладает метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Возможности метода СЗМ, сочетают визуализацию топографии и структуры, а также манипуляции нанообъектами с помощью механического микрозонда с приложением слабых и сильных разрушающих воздействий, и до конца еще не исчерпаны.

В Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси предложены новые решения в области оборудования и новые методологические подходы СЗМ анализа наноструктурных материалов и биологических объектов (клетки, ткани). Наряду с первичными для СЗМ изображениями топографии практически все модели современных сканирующих зондовых микроскопов позволяют получить дополнительно изображения контрастов на том же исследуемом участке. В зависимости от используемого режима сканирования это различные карты поверхности. Например, изображение латеральных сил для контактного режима, изображение сдвига фазы для полуконтактного динамического режима, изображение магнитных сил в магнито-силовом микроскопе и др. Оцифровка изображений, отражающих микромеханическую неоднородность поверхности возможна с помощью дополнительных измерений, которые позволяют выполнить количественные оценки в областях с различными свойствами.

Традиционно в Республике Беларусь активно развиваются методики зондовой микроскопии, направленные на характеризацию локальных упругих, адгезионных и фрикционных свойств наноструктурированных материалов. Такими являются измерения зависимости силы взаимодействия острия зонда с поверхностью образца от расстояния между ними (статическая силовая микроскопия) с последующей оценкой. Следующим этапом оценок является теоретическая интерпретация полученных изменений силы от расстояния и последующий расчет модуля упругости.

Важными являются исследования, реализующие разрушающие воздействия на образец в процессе сканирования. Разрушающие воздействия

острием зонда АСМ могут быть использованы при оценке твердости и износостойкости материалов в поверхностных слоях. В этих случаях твердых материалов обычно используется алмазное острие. При испытаниях на износостойкость оценивается толщина снимаемого материала при сканировании образца в зависимости от приложенной к зонду разрушающей нагрузки (рис. 2 а). Процесс наносверления заключается во вращательном движении наноиндентора с одновременной регистрацией латеральной силы действующей на острие. Радиус вращения можно регулировать, уменьшая вплоть до десятков нанометров с приближением площади перекрытия площадки контакта индентора и зоны трения на образце к полной. Метод позволяет изучать явления локального изменения материала в результате трибохимических реакций на пятнах контакта. На примере (рис. 2б) показан эффект локального окисления кремния под органическим мономолекулярным слоем при вращении острия по радиусу 100 нм.

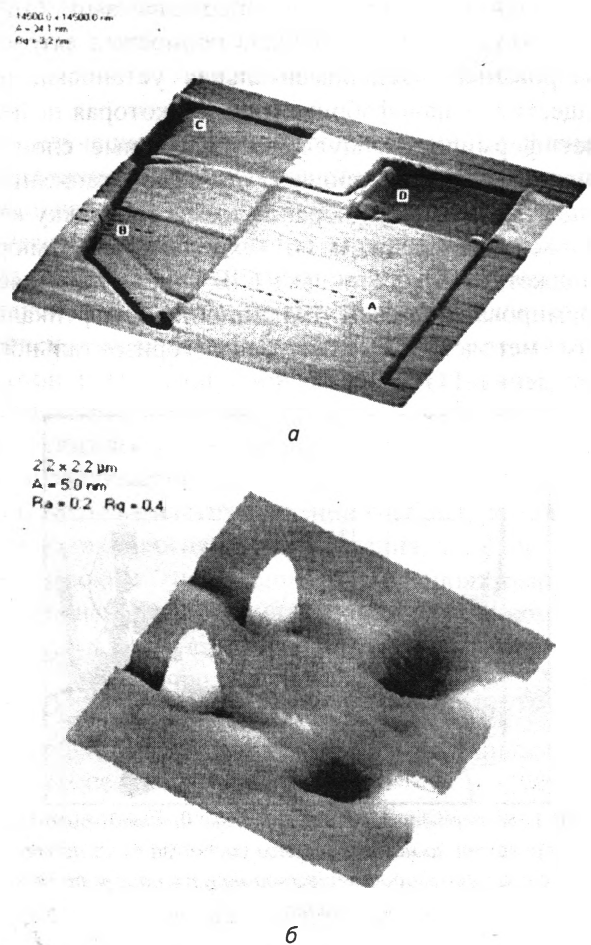


Рис. 2. Результаты АСМ испытаний материалов с помощью процедур наноизнашивания (а) и наносверления (б)

Современные тенденции к совершенствованию методов контроля в нанометровом масштабе требуют адаптации СЗМ оборудования в зависимости

от условий применения. Кроме того, проводятся работы по созданию острых зондов на базе природных и синтетических алмазов. Работы по созданию зондов АСМ с использованием планарных технологий успешно проводятся в кооперации НПО «Интеграл» и БГУИР.

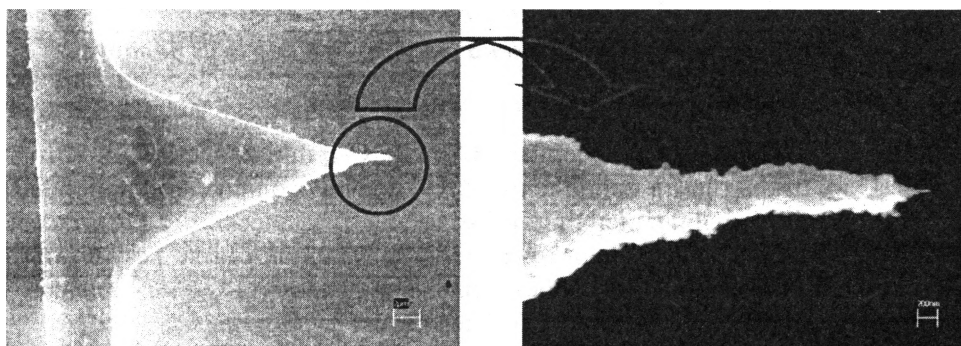


Рис. 3. Зонд АСМ модифицированный единичной углеродной нанотрубкой

от областей приложения. НПО «Планар» совместно с ИТМО НАН Беларуси разрабатывается диагностический комплекс, совмещающий самые передовые методики оптической микроскопии и функции сканирующей зондовой микроскопии для потребностей субмикронной электронной электроники. Комплекс позволит работать с кремниевыми пластинами диаметром 200 мм и будет включать их автоматический загрузчик.

Для работы с биологическими объектами ИТМО НАН Беларуси совместно с НПРУП «ЛЭМТ» и ОДО «Микротестмашины» путем модифицирования АСМ НТ-206 был создан экспериментальный комплекс с функциями сканирующей зондовой и оптической микроскопии. Входящая в его комплектацию специализированная оптическая система дает возможность визуализировать биологические клетки, осуществлять их выбор для анализа и позиционирование зонда в микромасштабе (увеличение более $\times 500$), включая работу в жидкостной ячейке.

В кооперации ИФ и ИТМО НАН Беларуси разрабатывается первый отечественный сканирующий ближнеполевой оптический микроскоп. В процессе разработки была создана модификация АСМ НТ-206, реализующая режим «shear force» сканирования, обеспечивающая достаточно высокое пространственное разрешение и упрощающая конструкцию.

Совершенствование СЗМ зондов включает модифицирование кремниевых острых коммерче-

ских АСМ зондов единичной нанотрубкой (рис. 3), включая моделирование их процессов их контактирования с образцом численными методами

молекулярной динамики. Кроме того, проводятся работы по созданию острых зондов на базе природных и синтетических алмазов. Работы по созданию зондов АСМ с использованием планарных технологий успешно проводятся в кооперации НПО «Интеграл» и БГУИР.

Заключение

Использование СЗМ в процедурах контроля промышленных изделий, например в субмикронной электронике, требуют разработки стандартов нанометрологии. В настоящее время в БелГИМ выполняется задание на эту тему в ГНТП «Эталоны и научные приборы».

Современные задачи по инновационному развитию страны требуют более активного перехода от стадии фундаментальных исследований к научно-техническим разработкам по созданию нанотехнологий, новых наноструктурированных материалов приборов и оборудования для нанодиагностики и nanoиндустрии, практического их использования и освоения новых материалов и изделий в производстве. В 2009 году стартует первая из научно-технических программ в области нанотехнологий, планируемых в рамках Союзного государства Беларуси и России. Она будет направлена на разработку нанотехнологий и наноматериалов для совершенствования космической техники. Одним из основных требований по включению проектов в программу будет освоение результатов в производстве.