

НАНОИЗМЕРЕНИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ



МАТВЕЕВ Владимир Иванович

Канд. техн. наук, ЗАО НИИ Интроскопии МНПО «Спектр», Москва

Наноизмерения стали обычными процедурами в современных технологических операциях, особенно в электронике, материаловедении и биологических исследованиях. Этой теме посвящено множество работ, в частности [1–5].

Вещество в коллоидном состоянии диспергировано до очень малых частиц или пронизано мельчайшими порами порядка 1,0–100 нм, не видимыми в оптический микроскоп, но превышающими по размерам отдельные молекулы. Это и послужило в свое время основанием введения терминов «ультрадисперсность» и «микрорегетерогенность» для характеристики малости размеров дисперсной фазы коллоидных систем.

Конкретный термин «нано» появился позже, в конце второй половины 20 в., в связи с развитием, прежде всего, микроэлектроники. И дело не в том, кто первым ввел термин в обиход, а в том, кто в числе первых использовал реально новые свойства наночастиц и нанотехнологий на практике.

Так, концерн «Наноиндустрия» (Москва), созданный в 2001 г., стал лидером в разработке и производстве нанопроductии в целях развития бизнеса на основе коммерциализации прикладных нанотехнологий и организации на их базе производств. Например, разработан и производится нанодисперсный состав «Стрибойл», который эффективно применяется в узлах трения различных видов оборудования. Это автомобили, тепловозные двигатели, дизели кораблей, станки, энергетические установки и т.д. При добавлении состава в моторное масло автомобиля последний через 50–100 км начинает жить по-новому: увеличивается компрессия

двигателя, снижаются вибрация и шум, выравнивается работа цилиндров, экономия топлива достигает иногда 20%. До 50% снижаются выбросы вредных газов. Это конкретная экономика, уменьшение нагрузки на экологию, особенно в мегаполисах.

Другим направлением работ является производство наночастиц металлов, в частности серебра, которые обладают очень высокими антибактериальными свойствами. Так, существенный биоцидный эффект при низкой токсичности для окружающей среды и человека демонстрирует дезсредство нового поколения – коллоидное наносеребро AgБион-2. Его использование при уборке помещений Международного центра торговли в Москве в течение 1,5 лет позволило снизить заболеваемость ОРВИ среди сотрудников в 2–3 раза.

Разработана технология получения наноразмерных структур полититаната калия, спектр применения которых охватывает получение высокопрочной керамики, огнестойких строительных материалов, упрочненных алюминиевых и титановых сплавов, ультратонких фильтров для очистки воды и другой продукции [6]. В настоящее время нанотехнологии и наноматериалы используются в машиностроении, медицине, сельском хозяйстве, строительных материалах и конструкциях, а также в проектах ресурсосбережения и создания альтернативных источников энергии. Концерн «Наноиндустрия» с 2004 г. проводит ежегодные научно-практические конференции «Нанотехнологии – производству» в наукограде Фрязино, где обсуждаются конкретные практические результаты в направлении развития нанотехнологий. Кстати, на одном из заседаний участники конференции поздравили директора ИРЭ РАН (Москва, Фрязино) академика РАН Ю.В. Гуляева с награждением медалью ЮНЕСКО за развитие электроники, наноауки и нанотехнологий.

В концерне «Наноиндустрия» разработан и производится современный нанотехнологический комплекс «Умка» – прекрасный инструмент для проведения исследований и обучения современным методам работы на наноразмерном уровне. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) «Умка» (рис. 1) предназначен для проведения исследований поверхностей в области физики, химии, биологии, медицины, материаловедения и других фундаментальных и прикладных наук. СТМ позволяет осуществлять исследование электропроводящих и полупроводниковых поверхностей материалов на

атомно-молекулярном уровне в атмосферных условиях. Результаты исследований получаются в виде четких 2D- и 3D-изображений. Прибор компактен, виброустойчив, отличается удобством и надежностью работы. Его можно использовать в условиях, обычных для электронных приборов.

Функциональные возможности СТМ «Умка»: определение топологии поверхности образцов с атомарным разрешением и получение ее четких 2D- и 3D-изображений; определение работы выхода и импеданса с определением примесей в исследуемом материале; определение вольт-амперных, вольт-высотных и дифференциальных характеристик материала с определением типа проводимости материала, анализом структур проводящих и магнитных образцов на атомно-молекулярном уровне; измерение параметров профиля (шероховатость, размер включений и наночастиц); оценка длительного внешнего воздействия на образцы в режиме реального времени (*in situ*) (определение коррозионной устойчивости, радиационного воздействия и т.д.).

Другая всемирно известная компания «НТ-МДТ» (Москва, Зеленоград) является разработчиком и производителем скани-

рующих зондовых микроскопов и оборудования на их основе. Специалисты компании первыми в мире разработали серийный прибор, совмещающий атомно-силовую микроскопию и спектроскопию комбинационного рассеяния света. В настоящее время разработки НТ-МДТ используются практически во всех областях научных исследований и технологий, позволяя проводить исследования широкого круга материалов с нанометровым пространственным разрешением. Данное оборудование успешно используется в России, странах СНГ и Евросоюза, а также США, Китае, Японии и Австралии. Сегодня НТ-МДТ успешно конкурирует с такими всемирно известными компаниями, как Veeco (США) и Seiko (Япония). Сканирующая зондовая лаборатория Ntegra в 2004 г. была признана лучшей разработкой в мировом конкурсе зондовой микроскопии, прошедшем в университете графства Сюррей – центре нанотехнологий Великобритании.

Модульная структура сканирующей зондовой лаборатории Ntegra Aura (рис. 2) позволяет проводить исследования образцов в контактном, прерывисто-контактном и бесконтактном вариантах. Возможна работа в двух

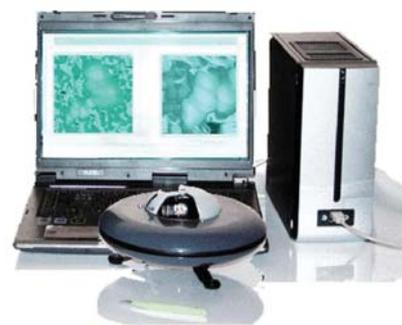


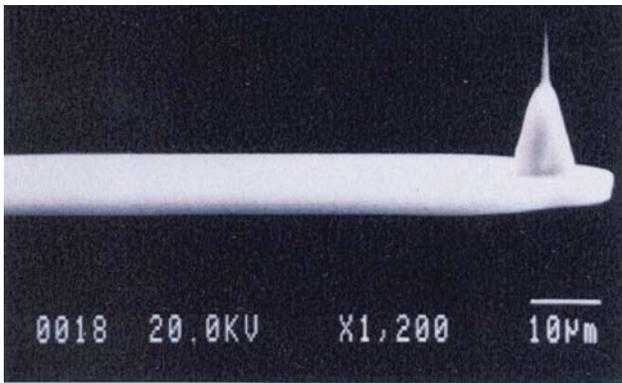
Рис. 1. СТМ «Умка» (концерн «Наноиндустрия»)

режимах: атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Наличие вакуумной системы (давление до 10^{-2} торр) позволяет проводить более аккуратный анализ сил взаимодействия между зондом и образцом. Аппаратура в целом позволяет выполнять любые исследования физико-химических свойств поверхностей нанобъектов и наноструктур с помощью современных методов зондовой микроскопии, а также реализовывать собственные алгоритмы обработки данных. Точность измерения перемещения системы сканирования по вертикали составляет 0,1 нм, а в латеральном направлении 1 нм.

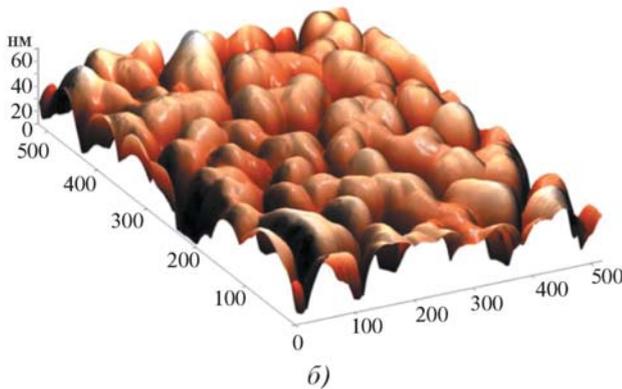
Основной частью атомно-силового микроскопа является



Рис. 2. Сканирующая зондовая лаборатория Ntegra Aura (слева) и АСМ NanoE-dicator II (справа) компании «НТ-МДТ»



а)



б)

Рис. 3. Зонд кантилевера из кремния (а) атомно-силового микроскопа с радиусом острия менее 5 нм (АО «Ангстрем») и трехмерное АСМ-изображение (б) HSG-Si пленки размером 500× 500 нм²

кантилевер со сверхострым зондом. Один из примеров трехмерного изображения поверхности образца показан на рис. 3.

HSG-Si-пленка представляет собой слой, образованный из плотно упакованных зерен, имеющих примерно одинаковый размер. Размер зерен в зависимости от условий формирования может варьироваться от 2 до 200 нм. Пленки HSG-Si используются в современных интегральных схемах в элементах динамической памяти (DRAM) в качестве нижнего электрода конденсатора.

Важнейшей задачей становится вузовская подготовка инженеров – специалистов, а в дальнейшем подготовка и сертификация персонала для эффективного применения современной нанодиагностической аппаратуры. Во многих вузах ведется обучение специальностям по нанообразовательным процессам. В ряде регионов созданы центры наноиндустрии. Компания «NT-MDT» разработала специальный ориентированный на студентов продукт – NanoEducator (рис. 4), который открывает окно в мир «нано» с изучением нанотехнологий [7]. В МИЭТ (Москва, Зеленоград) также разработана учебно-исследовательская установка ро-

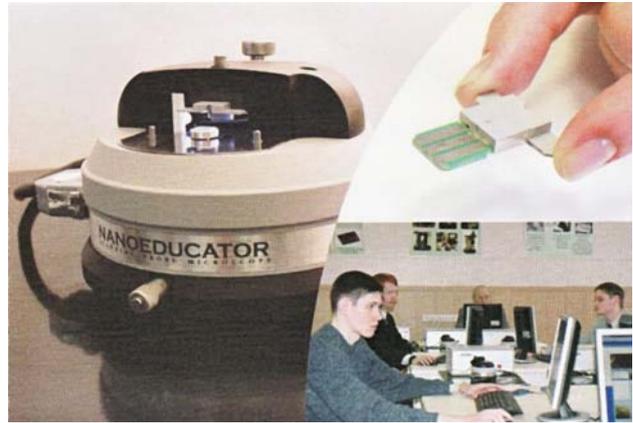


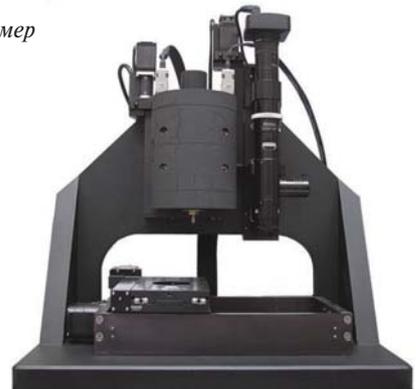
Рис. 4. Нанообразовательный комплекс NanoEducator (компания «НТ-МДТ»)

ста углеродных нанотрубок, одного из самых перспективных материалов.

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ, Москва, Троицк) разработал нанотвердомер «НаноСкан-4Б» (рис. 5), предназначенный для измерений твердости материалов по шкалам индентирования в соответствии с ГОСТ Р 8.748–2011.

ТИСНУМ ведет работы по созданию конструкционных наноматериалов новых систем: металл, металл-углерод, углерод-углерод, а также наноструктурированных керамик. Уже получены материалы с уникальными механическими свойствами в виде сплавов на основе алюминия, титана, циркония; твердые сплавы на основе TiC-ZrC; ультратвердые фуллериты; керамика β -Si₃N₄, UO₂. Также получены новые наноструктурированные термоэлектрические материалы на базе Bi₂Te₃. ТИСНУМ придает большое значение кооперации с российскими и зарубежными институтами, такими как: Курчатовский научный центр, Институт кристаллографии РАН, ГИРЕДМЕТ, Университет г. Умеа (Швеция), Университет г. Манчестер (Великобритания), Лаборатория кристаллографии Академии наук Франции и ряд других научно-технологических центров России, Австрии, Германии, США и Японии [8].

Рис. 5. Нанотвердомер «НаноСкан-4Б» (ТИСНУМ)



Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума (НИЦПВ, Москва) является научным метрологическим центром в области создания и применения эталонов единицы длины в микро- и нанометровом диапазонах, методов и средств метрологического обеспечения акустико-эмиссионной аппаратуры и преобразователей акустической эмиссии, зондовой микроскопии: растровой электронной, просвечивающей электронной, сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии.

Эталонная система (рис. 6) на основе атомно-силового микроскопа оригинальной конструкции и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений предназначена для измерения нанорельефа поверхности и линейных перемещений по трем координатам в микроэлектронике, нанотехнологии и микромеханике, аттестации мер и стандартных образцов для калибровки растровых электронных и сканирующих зондовых микроскопов.

Основные параметры лазерного измерителя наноперемещений следующие: диапазон измерения перемещений 1 нм–10 мм; дискретность отсчета 0,1 нм; абсолютная погрешность измерений 0,5–3,0 нм; максимальное значение измеряемой скорости перемещения 3 мм/с [9].

Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии стали приоритетными, активно обсуждаемыми в научном сообществе. Работа одной из международных школ проходила в научном центре г. Черноголовки МО [10]. Целью мероприятия было создание площадки для обсуждения актуальных проблем nanoиндустрии, повышения квалификации в области метрологического обеспечения производств, испытаний и стандартизации продукции специалистами компаний, регулирующих органов, испытательных центров и лабораторий. Среди главных тем, рассмотренных в ходе работы международной школы, были: российская и

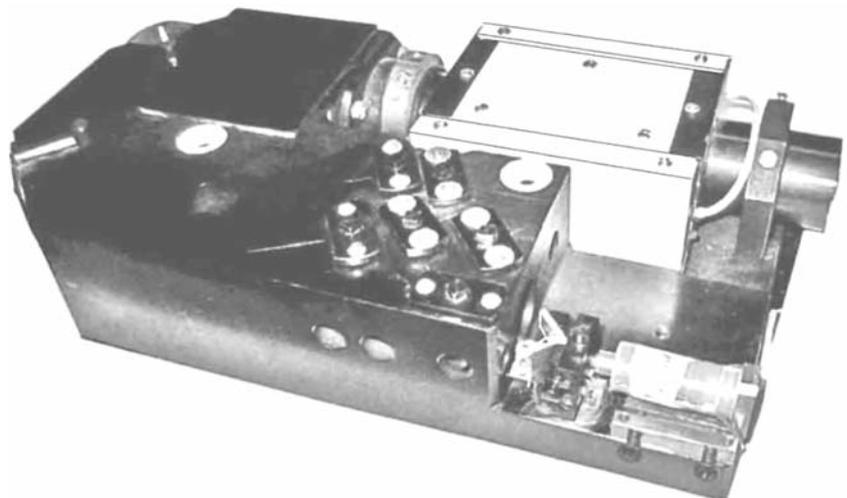
международная практика в метрологии и стандартизации продукции nanoиндустрии; прикладная метрология; характеристика перспективных наноматериалов и наноструктур. В этом мероприятии приняли участие более 230 специалистов, представлявших 59 организаций из 10 стран: Беларуси, Бельгии, Великобритании, Китая, России, США, Франции, Швейцарии, Швеции, Японии.

Коллективный доклад «Графен и новые горизонты метрологии» был представлен учеными Великобритании, Швеции и Франции. Суть темы: графен – перспективный материал, который всесторонне исследуется микроскопическими, спектроскопическими и зондовыми методами. Он обладает идеальными для метрологии свойствами, сравнительно легко получается, обрабатывается и применяется, что позволит в будущем оснастить первичными квантовыми стандартами специализированные метрологические центры, заводские, исследовательские и учебные лаборатории.

В другом коллективном докладе «Определение параметров атомной и электронной структуры наноматериалов», представленном зав. кафедрой физики наносистем и спектроскопии Южного федерального университета, профессором А. Солдатовым (Ростов-на-Дону) в соавторстве с учеными из Франции, Швейцарии и Бельгии, особое внимание было уделено новому методу определения параметров атомной структуры наноструктурированных материалов, позволяющему находить с высокой точностью (до 0,002 нм) межатомные расстояния и угловое распределение атомов в них.

С нанометрологией тесно связана стандартизация, первоочередные задачи которой заключаются в нормативном обеспечении методик измерений, стандартных образцов и мер, а также безопасности при их воздействии на окружающую среду. Работы в этом направлении проводятся, и уже имеются положительные результаты. В большинстве докладов

Рис. 6. Эталонная 3D-лазерная интерферометрическая система измерений наноперемещений (НИЦПВ)



обсуждались вопросы реализации нанотехнологий в электронике, медицине, химии, биологии и в других областях науки и техники. Речь, в частности, шла о высокоточных измерениях при исследованиях и производстве нанопроductии и прежде всего об определении размеров формируемых структур. Так, в докладе зав. отделом электронной кристаллографии Института кристаллографии РАН д-ра физ.-мат. наук А. Авилова рассматривались результаты измерений размеров наночастиц и тонких пленок с метрологическим обеспечением их методом малоугловой рентгеновской дифрактометрии – одного из основных при определении размерных параметров в нано- и субнанометровом диапазонах. Достоверность измерений обеспечивается стандартными образцами и методиками калибровки малоугловых рентгеновских дифрактометров. Интерес вызвал также доклад директора ООО «Системы для микроскопии и анализа» В. Шкловера (Москва) «Трехмерная характеристика субмикронных биологических и биогенных структур». В нем сообщалось об объемной электронной микроскопии – перспективном методе исследований и характеристики нанообъектов. Получаемая структурная информация позволяет визуализировать на субмикронном уровне, вплоть до наноструктур, сложную микроанатомию тканей в функционально значимых объемах образца.

Результаты нанотехнологий воплотились в новых преобразователях и устройствах нанодиагностики [11–16]. Это новые преобразователи и системы неразрушающего контроля и диагностики. Одним из главных путей развития методов и средств неразрушающего контроля нового поколения является использование известных наноэффектов и разработанных на основе нанотехнологий наносенсоров и нанопреобразователей. Это как минимум позволяет значительно улучшить три основные характеристики новых приборов: повысить чувствительность и разрешающую способность и при этом уменьшить массогабаритные параметры. В качестве примеров можно привести применение молекулярных фильтров, наноанализаторов химических и биологических веществ, новых видов рентгеновских сцинтилляторов, оптических наноструктур на «квантовых точках», сверхпроводниковых болометров, высокочувствительных магнитных датчиков и т.д.

Обнаружение эффекта гигантского магнитосопротивления лауреатами Нобелевской премии по физике А. Фертом и П. Грюнбергом в тончайших металлических пленках толщиной приблизительно 1 нм привело к возможности создания сверхчувствительных и миниатюрных магнитных датчиков. Эффект имеет квантовую природу и стал доступен для наблюдения после появления технологии изготовления металлических нанопленок и нанопровод-

ников из чередующихся слоев магнитных и немагнитных металлов. Первое применение сверхчувствительных микроминиатюрных магнитных датчиков произошло в компании IBM, выпустившей жесткие диски с существенно большей плотностью записи информации. Это дало толчок дальнейшему развитию магниторезистивных прецизионных преобразователей магнитного поля для широкого практического применения. Элементы, выполненные на основе нанотехнологий, позволили создать измерительные матричные преобразователи для магнитовизоров с повышенной чувствительностью и расширенным диапазоном измерения магнитного поля.

Развивается также ИК-техника на основе многих современных технологий. В частности, разработаны неохлаждаемые болометры на основе диэлектрических мембран спектрального участка детектирования от 8 до 14 мкм для широкого применения в системах наблюдения и распознавания объектов на небольших расстояниях, инфракрасной микроскопии, медицинской и промышленной диагностики, беспилотных систем наблюдения, ИК-прицелов и т.п. Получили дальнейшее развитие квантово-размерные эпитаксиальные гетероструктуры для создания фотоприемников, использующих для регистрации излучения возбуждение квантами света носителей заряда из слоев с размерным квантованием – квантовых ям.

Новые нанотехнологии в производстве полупроводниковых материалов и гетероструктур привели к возможности изготовления чувствительных болометров для приемников терагерцового излучения, весьма перспективного в развитии средств НК и ТД. На их основе создан высокочувствительный матричный радиометр для проведения специальных исследований в малоосвоенном участке частот 0,13–0,38 ТГц (длины волн 2,3–0,8 мм). Высокая предельная чувствительность приемных элементов к принимаемому излучению 10^{-18} Вт • Гц^{-1/2} обеспечивается за счет субмикронных размеров поглотителей болометров и их сверхнизкой рабочей температуры 0,3 К. С их появлением терагерцовое радиовидение получит широкое развитие и применение.

Молекулярные фильтры и мембраны, созданные по нанотехнологиям, позволяют за секунды повысить концентрацию опасных примесей при решении аналитических задач в разных отраслях промышленности, экологическом мониторинге, функционировании систем жизнеобеспечения и безопасности, создании новых видов антитеррористических приборов – газоанализаторов. Новое поколение газоанализаторов «НаноСлед» имеет чувствительность на уровне 100^{-14} г/см³ при времени анализа несколько секунд.

В последнее время значительный интерес проявляется к новому типу материалов – полимерным

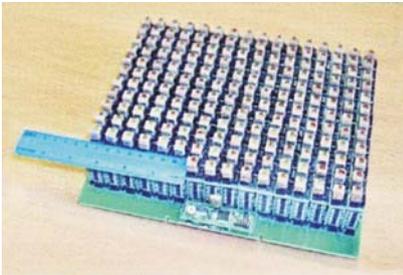


Рис. 7. Матрица магниторезистивных датчиков

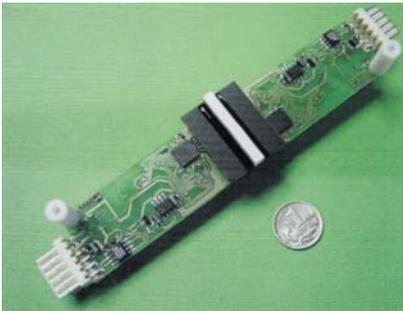


Рис. 9. Линейка детекторов рентгеновского излучения

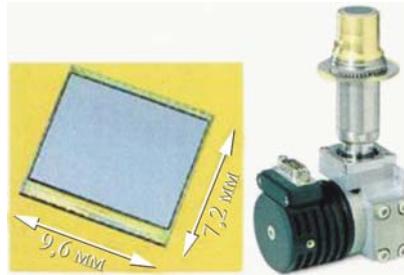


Рис. 8. Матрица и ИК-детектор на «квантовых ямах»

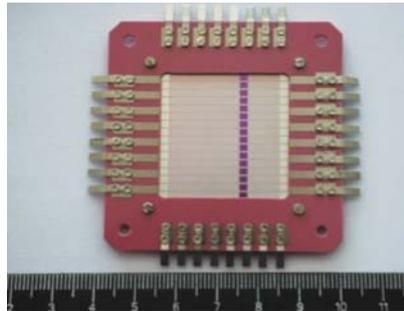


Рис. 10. Матрица альфа-детекторов

нанокомпозитам, в которых полимерная матрица содержит включения нанометрового размера (наночастицы, нанопровода, нанопленки) другого вещества. Такие материалы проявляют необычные электрофизические, магнитные, каталитические и другие свойства. Использование подобных наноэлементов, чувствительных к запахам, дает возможность изготовить компактные матрицы и на их основе портативные анализаторы типа «электронный нос». Любая находящаяся в воздухе молекулярная комбинация, попадая в одну из 2200 ячеек кристалла «электронного носа», кодируется и обрабатывается интегрированным компьютером. Чувствительный элемент такого датчика способен распознать наличие в воздухе зарина, аммиака, углеводородов и других веществ, поскольку каждому из них соответствует своя характерная кривая изменения сопротивления от времени.

На основе современных технологий синтеза нанокристаллических материалов разработаны новые виды сцинтилляционных де-

текторов рентгеновского излучения с улучшенными техническими параметрами: энергетической эффективностью, быстродействием, пространственным разрешением, радиационной прочностью. Размер сцинтилляционных наночастиц может регулироваться параметрами синтеза от 10 до 100 нм. Малые размеры наносцинтилляторов позволяют изготавливать из них рентгеновские детекторы с субмикронным пространственным разрешением. Детекторные матрицы (рис. 7, 8), изготовленные из новых сцинтилляционных элементов, позволяют сократить время рентгеновского просвечивания и уменьшить получаемые объектом дозы облучения, а также значительно улучшить чувствительность и информативность инспекционной техники. Линейка детекторов (рис. 9) применяется самостоятельно и для создания детекторных матриц различных размеров, собранных путем соединения отдельных модулей, для использования в системах неразрушающего технологического контроля, а также в системах безопасности и медицины.

В последнее время [17] разработана современная матрица кремниевых альфа-детекторов (рис. 10) нейтронов и гамма-квантов, изготовленная на основе нанотехнологий, примененная в устройствах обнаружения закамуфлированных взрывчатых и наркотических веществ.

Необходимо добавить, что и традиционные методы измерений, постоянно совершенствуясь, стали входить в область нанотехнологий. Так, например, для измерения толщины металлических нанопокровов и нанопленок стали использовать электромагнитные волны сверхвысоких частот (микроволны). При реализации метода измеряют изменение амплитуды (интенсивности) прошедшей через объект контроля электромагнитной волны, т.е. метод микроволновой трансмиссии. Известно, что от металлических материалов радиоволны почти полностью отражаются, проникая лишь на очень малую величину, обусловленную скин-эффектом. В результате очень тонкие металлические пленки можно контролировать с высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Чем выше удельная проводимость металла и частота электромагнитных волн, тем меньше глубина их проникновения $\delta = \sqrt{2/(\omega \gamma \mu_a)}$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость металла. Например, на частоте 10 ГГц (длина волны $\lambda = 3$ см) глубина проникновения для меди равна 0,66 мкм, для алюминия 0,82 мкм, для вольфрама 1,18 мкм, никрома 5,03 мкм и т.д. Поэтому через тонкие металлические пленки толщиной до 0,5 мкм микроволны проходят с большой крутизной затухания.

Типичным примером использования метода является микроволновый толщиномер «Электротест Т» (фирма «Электрофизик», Германия), работающий на частоте 30 ГГц ($\lambda = 1$ см) в диапазоне толщин 5–250 нм с погреш-

ностью измерения $\pm 3\%$ от измеряемой величины. Локальность контроля соответствует кругу $\varnothing 10$ мм. Индикация результатов цифровая. Измерения проводятся бесконтактно при перемещении рулонных материалов между передающей и приемной антенной микроволнового преобразователя. Как правило, контролю подвергаются покрытия из алюминия, меди, серебра, золота, никеля, хрома, кобальта и других материалов, наносимых на диэлектрическую основу в виде тонких пленок. Естественно, что при смене материала металла требуется калибровка индикатора на стандартных образцах. Типичными примерами технологий являются изготовление конденсаторных лент, дисков звукозаписи, памяти, зеркальных стекол и т.п.

Эллипсометрический метод получил дальнейшее существенное развитие в связи с широким внедрением лазеров в измерительные технологии. В настоящее время лазерные быстродействующие эллипсометры применяют для измерений не только толщины, но и показателя преломления многочисленных пленочных гетероструктур нанометрового диапазона. Типичным прибором является современный эллипсометр ЛЭФ-752 (ИФП СО РАН). В нем используется HeNe-лазер, обеспечивающий локальность контроля параметров пленок в зоне $\varnothing 2$ мм. Толщина пленок измеряется до значений 60000 \AA ($0-6$ мкм) с точностью $\pm 5 \text{ \AA}$, а погрешность измерения показателя преломления δn составляет $\pm 0,005$.

Развитие порошковых нанотехнологий вызвало необходимость оперативного контроля размеров частиц при их образовании, осаждении и т.п. Гранулометрический анализ является одной из важнейших составляющих современных производств и научных разработок. Свойства порошковых материалов во многом зависят от размера создающих их частиц. Преимущественное распространение получили дифракционные методы анализа и контроля. В основе лазерной дифракции заложен принцип рассеяния (ослабления) света частицами. Рассеянное частицами излучение лазера регистрируется под разными углами с помощью высокочувствительного многоэлементного детектора (фотодиодной матрицы). В конкретных дифрактометрах используются различные типы лазеров и фотоприемников. Так, в дифрактометре «Анализетте 22» (фирма Fritsch, Германия) применяется HeNe-лазер и шесть волоконно-оптических приемных каналов, что в итоге обеспечивает 3%-ную точность измерений размеров частиц в диапазоне $3-3000$ нм. Конструкция включена в ИСО 13320-1 под названием «обратная оптика Фурье».

Оригинальный метод оценки размерной концентрации частиц в коллоидном состоянии предложен компанией «Инфраспек-Аналит» (Новосибирск), который заключается в измерении тока проводимости кондуктометром «АНИОН 7025»,

в результате чего обнаруживается резонанс тока от концентрации нанообъектов в растворе. В отличие от теоретической зависимости экспериментальный резонанс, очевидно, обусловлен проявлением особых свойств частиц в коллоидном состоянии при их определенной концентрации. Характерно также, что резонанс смещается при наполнении раствора частицами другого размера.

Качество поверхностей оценивают параметрами шероховатости, твердости, износостойкости. Класс шероховатости поверхности оказывает влияние на сопрягаемость деталей и посадок, работу смазывающего слоя, износостойкость, адгезию, отражательную способность и многие другие характеристики. Шероховатость поверхности оценивают рядом размерных параметров, основными из которых являются Ra и Rz . Измерение этих параметров осуществляют оптическими или контактно-щуповыми приборами. Выбор метода и средства зависит от условий и требований к контролю. Современные измерители шероховатости с индуктивными и пьезоэлектрическими преобразователями обладают высокой точностью и надежностью. Приборы с пьезоэлектрическими преобразователями более портативны и контролепригодны, а приборы с индуктивными преобразователями более универсальны, поскольку позволяют измерять не только многочисленные параметры шероховатости, но и волнистость поверхности, общий профиль и контуры изделий. Одна из распространенных портативных моделей TR 200 (ZONHOW, Китай) с индуктивным преобразователем позволяет измерять около 15 параметров качества поверхности с 10%-ной точностью в диапазоне неровностей от 10 нм.

Анализ приведенных примеров показывает тесную взаимосвязь средств НК и ТД с современными нанотехнологиями и их взаимное влияние.

Заключение. Неизбежно проникновение разума в суть материи. Пока наука находится еще в самом начале этого пути. Однако уже достигнутые результаты впечатляют новыми возможностями наноматериала в создании новых структур и материалов. Впереди ожидаются новые открытия, столь необходимые для улучшения качества жизни человечества.

Библиографический список

1. Гусев А.И. Нанотехнологии, наноструктуры, наноматериалы. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. Киреев В.Ю. Нанотехнологии: история возникновения и развития // Наноиндустрия. 2008. № 2. С. 2–8.
3. Веймарн П.П. К учению о состоянии материи: Основания кристаллизационной теории необратимых коллоидов. СПб.: Экон. типо-лит., 1910. 192 с.
4. Сырков А.Г. О приоритете Санкт-Петербургского горного университета в области науки о нано-

- технологиях и наноматериалах // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 730–736. DOI 10.18454/PMI.2016.5.730.
5. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
 6. Ананян М.А. Нанотехнологии в технических системах: презентация / ЗАО «Концерн «Наноиндустрия»; Национальная ассоциация наноиндустрии. М., 2014. URL: myshared.ru.
 7. Быков В.А., Васильев В.Н., Голубок А.О. Учебно-исследовательская мини-лаборатория по нанотехнологии на базе сканирующего зондового микроскопа NanoEducator // Российские нанотехнологии. 2009. № 5–6. С. 45–47.
 8. Нанотвердомер «НаноСкан-4Б» / ФГБНУ «ТИС-НУМ». М., Троицк. URL: all-pribors.ru
 9. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Нанометрология в нанотехнологиях // Нано и микросистемная техника. 2006. № 12. С. 11–19.
 10. Матвеев В.И. Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и наноиндустрии // Наноиндустрия, 2012. № 6. С. 36–38.
 11. 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю // Контроль. Диагностика, 2010. № 8, С. 5–6, 51–52.
 12. Матвеев В.И. Нанотехнологии и нанодиагностика – основные тенденции в развитии // Тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству 2010», г. Фрязино, 1–3 декабря 2010 г. Фрязино, 2010. С. 119–120.
 13. Клюев В.В., Бобров В.Т., Матвеев В.И. Состояние и задачи развития средств нанодиагностики // Изв. Томск. политехн. ун-та [Известия ТПУ]. 2008. Т. 312, № 2. Математика и механика. Физика. Приложение: Неразрушающий контроль и диагностика. С. 5–13.
 14. Матвеев В.И. Нанотехнологи всех стран собрались в Москве (Rusnanotech 08) // Мир измерений. 2009. № 3. С. 62–63.
 15. Матвеев В.И. Rusnanotech-2010 // Мир измерений. 2011. № 4. С. 59–62.
 16. Матвеев В.И., Пугачёв С.В. Наносенсоры для матричных преобразователей приборов неразрушающего контроля // Нанотехника. 2012. № 2. С. 89–92.
 17. Пат. RU 80004 U1. G01N 23/000. Устройство для идентификации скрытых веществ / В.М. Быстрицкий, Н.И. Замятин, В.Г. Кадышевский и др.; ОИЯИ, г. Дубна; опубл. 20.01. 2009. ■



CONSTANTA
ПРИБОРЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В наших силах
сохранить
ЭТОТ МИР

constanta.ru

