

¹Ковальчук В. В., доктор фізико-математических наук, проф.,
²Долинская Людмила Васильевна, преподаватель

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И ПРИНЦИПОВ АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУР

¹Одесский колледж компьютерных технологий Одесского экологического университета
²Одесская Военная академия

Предложены принципы исследования аппаратурного обеспечения измерений характеристик квантово-размерных объектов - нанобъектов. Приведены данные маркетинговых исследований в области нанотехнологий.

Ключевые слова: наноструктуры, аппаратура, измерение

Введение. Сегодня усилия многих научно-исследовательских групп направлены на получение и обработку информации о глубоко-субмикронных структурах – наноструктурах (НС). Это стимулирует развитие технологических процессов нового поколения – нанотехнологий (НТ). Предполагается, что в XXI столетии НТ станет ведущим направлением деятельности различных секторов промышленности [1].

Ускоренное развитие НТ связывают с интегральной полупроводниковой электроникой – наноэлектроникой (НЭ), основным принципом которой стало повышение уровня интеграции за счет уменьшения размеров активных элементов, размещаемых на кристалле. Первыми нанобъектами (НО), которые с последней декады XX ст. активно используют в промышленности, стали тонкие пленки Ленгмюра-Блоджет с толщиной менее 100 нм, т.е. объекты с квантово-размерной спецификой [2].

Заметное влияние на развитие НТ оказали также биотехнологии, которые в настоящее время все шире и шире применяются в различных областях человеческой деятельности, и для которых операции с НО являются уже вполне естественными и очевидными, несмотря на критику скептиков [3]. Заметим, что несмотря на кризис, охвативший сегодня практически все страны мира, в экономически продвинутых государствах сформировались благоприятные условия для активизации работ по развитию НТ. Это открывает новые перспективы для эффективного выхода из экономического тупика. Правительства же тех государств, где нет понимания глубины этого обречены на научно-техническую маргинализацию.

Для повышения эффективности расходования средств, выделяемых на метрологическое обеспечение НТ, необходимо определить приоритетные направления развития НТ и нанопродукции. В этом контексте цель статьи направлена на проведение анализа тех факторов, которые обеспечивают позитивную динамику развития НТ. Задача работы состояла в системном изложении, существующих на сегодня, основных принципов аппаратурного обеспечения измерений физико-химических характеристик НО.

Изложение основного материала. Современный процесс развития НТ можно охарактеризовать двумя отличными друг от друга подходами. Один из них – «сверху-вниз» - основан на дальнейшем продвижении методов микроэлектроники. Цель – замена обычной промышленной технологической системы на НТ. Поэтому такой подход можно назвать эволюционным.

Второй подход – «снизу-вверх» - базируется на сборе наноструктур второго уровня с применением самоорганизующихся механизмов. Подобное революционное (синергетическое) направление представляет собой основу для инновационной деятельности в области промышленных технологий.

Именно «второй подход» и представляет собой тот технологический процесс, который может быть определен как НТ. Здесь важнейшей составляющей является создание и обеспечение функционирования различных наномашин или т.н. ассемблеров.

Ассемблеры, машины, которые обладают двумя основными свойствами - производить некую работу (в чем они схожи с обычными машинами) и возможностью самокопирования (в чем они принципиально отличаются от обычных машин). Ассемблер по Дрекслеру состоит из двух частей [4]: микрокомпьютера и управляемого манипулятора - это тот микроробот, который с помощью манипулятора расставляет атомы в порядке, имеющемся в памяти ассемблера.

Самый простой ассемблер можно собрать с помощью сканирующего туннельного микроскопа [5], загрузить в него программу самовоспроизводства, и тогда микроробот будет создавать таких же

микророботов. Ассемблер может не только производить некое вещество с заранее определенной молекулярной структурой и свойствами, но и делать точно такие же ассемблеры.

Не так давно открыта НС *имоголита* – водного алюмосиликатного минерала вулканического происхождения [6]. Синтезировать его научились еще в 1977 году, и примерно тогда же были исследованы его уникальные сорбционные свойства. Имоголит может применяться в качестве многоцелевого абсорбента, носителя катализаторов, носителя для ферроэлектрических или ферромагнитных частиц, применяемого в электронике поскольку способен накапливать и сохранять метан и воду. Исследования в области НТ позволили дать ответ на вопросы об уникальных свойствах этого материала. Можно не сомневаться, что имоголит будет в числе наиболее важных НТ материалов. Однако, в его применении нет ничего необычного и нанотехнологического. Он очень близок по химическому составу и структуре к слоистым силикатам, которые широко используются в производстве фарфора, керамики и бумаги, основ активных веществ, наполнителей красок, бумаги и резины, электроизоляции и кислотоупорных покрытий. Если имоголит – это НТ материал, то надо признать, что они были освоены человеком в глубокой древности. Во всяком случае, китайцы освоили такие «нанотехнологии» еще в I веке н.э., когда начали делать фарфор. Вместе с тем, даже пессимистически настроенные эксперты указывают на то, что НТ имеют громадные перспективы и ими необходимо заниматься. При этом делаются различные прогнозы развития НТ [6]. В своем анализе будущих экономических перспектив НТ Lux Research определяет тремя широкими секторами: 1) материалы и производства; 2) электроника и информационные технологии; 3) здравоохранение и медицинские науки.

Анализ А. Хулманна [6] показывает, что для будущего развития рынка НТ в настоящее время созданы весьма перспективные условия. В соответствии с моделью первый этап до 2004 г. предусматривал внедрение НТ в некоторые отдельные высокотехнологичные продукты. На следующем этапе, вплоть до 2009 г. – осуществлен прорыв в области НТ инноваций, особенно в НЭ. На третьем этапе, начиная с 2011 г. и далее, НТ приобретает контуры такого процесса, который воспринимается как нечто само собой разумеющееся. НТ в здравоохранении и медицинских науках уже применяется на рынках фармацевтической продукции и медицинских приборов. НТ уже вносят существенный вклад в развитие фармацевтической промышленности. По оценке Lux Research, в 2004 г. доля рынка нанотехнологической продукции составляла 4% от общего объема всей произведенной продукции. В 2014 г. общая доля НТ в объеме мирового производства составит 15%. Для реализации таких высоких темпов роста НТ необходимы высококвалифицированные кадры. К 2015 г. в соответствии с прогнозами штат сотрудников, работающих в области НТ, составит 2 млн. человек. По оценке Lux Research к этому времени на высокотехнологичных производствах будет открыто не менее 10 млн. производственных мест, связанных с НТ.

Для успешного развития НТ, nanoиндустрии и нанорынка одним из важнейших направлений является **метрологическое обеспечение**.

История развития науки и техники неразрывно связана с развитием системы методов и средств измерений. Переход к НТ ставит перед наукой и техникой ряд специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур. При этом, как никогда, актуален тезис: «если нельзя измерить, то невозможно создать» [7]. Специфика НТ привела к созданию и развитию нового направления в метрологии, с которым связаны все теоретические и практические аспекты обеспечения требуемой точности и единства измерений в НТ.

В метрологическом обеспечении нуждаются как сам технологический процесс создания новых НС, основанный на управлении перемещениями атомов, молекул или молекулярных систем в пространственных областях длин нанометрового диапазона, так и измерения параметров создаваемых наноустройств, а также характеристик материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами. Особый круг задач представляет съем и обработка измерительной информации с устройств нанометрового диапазона с соблюдением достоверности и метрологической надежности измерений.

Следует отметить, что измерения и контроль некоторых параметров технологических процессов в области НТ и применения наноустройств, а также характеристик материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами, создаваемых в результате промышленного применения НТ, во многих случаях осуществляется в рамках обычной метрологии. Однако новые характеристики и возможности изделий nanoиндустрии и свойства материалов, создаваемых в результате применения НТ, предъявляют особые требования к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами измерений и повышенной

точностью, что ужесточает требования к уровню обеспечения единства измерений в стране. В первую очередь это относится к точности, диапазонам измерений и функциональным возможностям первичных эталонов и обуславливает необходимость их направленного совершенствования, а также, возможно, и создания для Украины новых, исходных эталонов. Решение проблем метрологического обеспечения НТ не ограничивается совершенствованием эталонов. Требуется модернизация существующего и создание более современного поверочного оборудования. Необходима разработка нормативных документов на методы и средства поверки средств измерений. Совершенствование методики выполнения измерений в связи с развитием НТ остается актуальной проблемой.

Насколько существенным является повышение метрологических требований при переходе к наноразмерам можно проиллюстрировать на примере полупроводниковой микроэлектроники при ее развитии «сверху – вниз» в направлении НЭ.

Метрология – ключевое звено для полупроводниковой промышленности и будет оставаться таковым для будущих поколений полупроводниковых приборов до тех пор, пока геометрические размеры элементов полупроводниковых структур будут уменьшаться. В логических схемах и микропроцессорах уже приближаются к созданию структур атомарных размеров. В ближайшем будущем длина затвора транзисторов будет приближаться к 25 нм или даже меньше. Такой затвор меньше ширины 5 элементарных ячеек. Это и есть НТ, которая обеспечивается точной нанометрологией (НМ). Экспертные оценки показывают, что на метрологическое обеспечение развития микроэлектроники в направлении НЭ в США ежегодно тратится более 4 млрд. \$. Для многих компаний уже становятся абсолютно очевидными проблемы, которые связаны с уровнем точности, требуемой для НМ [7]. Влияние и результаты использования точных эталонов на полупроводниковую индустрию сформировало предмет глубокого анализа, когда мировая годовая продажа фотошаблонов составила почти 375 млн. \$. Использование точного эталона для ширины линии позволило промышленности США сэкономить в год до 30 млн \$.

На пути НТ инноваций представим перечень основных «метрологических барьеров» [6,7].

Первое (в биотехнологиях). Отсутствие измерительных преобразователей и устройств, предназначенных для обнаружения и последующего лечения заболеваний, вызванных инфекциями и нарушениями питания, включая авитаминоз. Решение задач в области здравоохранения. Выявление и прослеживание развития патогенных микроорганизмов в пищевых и сельскохозяйственных продуктах и культурах. Использование НТ для создания наносепараторов и нанобиореакторов. Обеспечения безопасности для здоровья человека пищевых продуктов. Количественное описание влияния окружающей среды и деградации почв. Создание предохраняющих от загрязнений наноповоротностей (например, при упаковке продуктов).

Второе (наноматериаловедение). Необходимость обеспечения широкого диапазона измерений, связанных с исследованиями, описаниями свойств, синтезом новых наноматериалов, с описанием и разработкой методов и средств измерений их свойств. Разработка направления развития инфраструктуры и национальных стандартов и международных соглашений, касающихся синтеза и анализа наноматериалов; созданием строгой и четкой системой практической метрологии в промышленности; разработкой зондов и измерительных головок для выполнения измерений и моделирования в процессе синтеза наноматериалов; измерениями воздействий наноматериалов на окружающую среду, здоровье и безопасность людей.

Потребность в разработке системы метрологического обеспечения процессов создания НС в качестве оптимизированных носителей энергии.

Потребность в системе метрологического обеспечения (включая терминологию, теорию, отображение информации и формирование изображений, моделирование), позволяющей использовать НС и принципы их функционирования при компоновке новых наноматериалов, предназначенных для использования в энергетике (перенос массы и энергии, регистрация данных, преобразование, производство).

Потребность в разработке системы метрологического обеспечения и соответствующей инфраструктуры, адаптированной применительно к специфике синтеза наноматериалов для специальных применений в энергетике (например, при создании углеродных нанотрубок для хранилищ водорода). Необходимость описания свойств наноразмерных цеолитов и наноструктур, применяемых в катализаторах химических процессов при контроле состояния окружающей среды.

Потребность в разработке системы метрологического обеспечения, необходимой для синтеза технологии изготовления диспергированных суспензий наночастиц без абсорбирующих добавок.

Потребность в метрологическом обеспечении новых нанопреобразователей и других

технических средств для обнаружения химических, биологических, радиологических и взрывоопасных веществ и материалов; наноматериалов для усовершенствования защитной одежды и фильтров, а также средств защиты от нападений.

Для преодоления данных барьеров национальные метрологические институты стран, с наиболее развитыми нанотехнологическими направлениями, создают специальные научно-исследовательские лаборатории, оснащенные современными средствами измерений, зачастую совмещенными с соответствующим технологическим оборудованием.

Наиболее известны подразделения метрологии [соизмерен] рационального института стандартов и технологии - NIST (США), Национальной физической лаборатории - NPL (Великобритания), Физико-технического института - PTB (Германия), Национального метрологического института - LNE (Франция). Оснащение данных лабораторий включает в себя ряд приборов, позволяющих проводить измерения физических величин в нанометровом диапазоне. А именно:

сканирующие электронные микроскопы (СЭМ); просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ); сканирующие туннельные микроскопы (СТМ); атомно-силовые микроскопы (АСМ); микроскопы ближнего поля; конфокальные микроскопы; интерференционные микроскопы и ряд других приборов обеспечивающих наивысшее разрешение по измеряемым физическим величинам при нанометровых размерах исследуемого объекта.

Однако, в процессе исследований различных наноструктур возникло понимание, что для решения задач обеспечения единства измерений параметров наноструктур данной приборной базы недостаточно. Возникла необходимость значительно повысить точность измерений и увеличить количество измеряемых параметров. Поскольку пока не разработано приборов, основанных на новых физических принципах, повышение точности приборов приведенных выше достигается за счет увеличения стабильности параметров окружающей среды, обеспыливания, всесторонней защиты от различных внешних воздействий. Эталонный нанометрический комплекс национального метрологического института Франции (LNE) на основе АСМ располагает измерительным объемом 300x300мм x50мкм. Для обеспечения высокой точности измерений прибор размещается в помещении с высоким уровнем обеспыливания и термостабилизации. Применяются специальные меры по защите от вибраций и акустических воздействий. Получение информации о различных физических параметрах НО во многих случаях может быть достигнуто только путем одновременного измерения ряда физических параметров. Поскольку при переносе объекта от одного прибора к другому ряд его свойства могут существенно измениться. Это привело к созданию комбинированных приборов, позволяющих, например, без выноса образца в атмосферу исследовать один и тот же участок образца методами сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, ближнепольной оптической микроскопии, дифрактометрии, поляриметрии и т.д.

Приборы подобного типа разработаны и используются в Национальной физической лаборатории. Например, оптико-рентгеновский интерферометр и атомно-силовой микроскоп в комбинации с рентгеновским интерферометром. Ввиду того, что появляется большое количество наноструктурированных материалов с новыми свойствами, количество нормируемых параметров, требующих проведения измерений постоянно возрастает. Также возникает необходимость создавать стандартные образцы новых наноструктурированных материалов и аттестовывать их. Поэтому для создания и исследования новых свойств наноструктурированных материалов необходимо иметь возможность проводить изготовление таких материалов, а также оказывать на них различные воздействия в процессе измерений. Этим требованиям соответствует измерительно-технологическая установка высшей точности для создания и исследования наноструктур, созданная в NIST (США). Данная установка считается одним из наиболее совершенных инструментов для исследований наноструктурированных материалов (рис.1).

Для повышения достоверности регистрации параметров нанобъекта его исследование осуществляется непосредственно сразу после изготовления, причем транспорт объекта из технологической камеры в измерительную осуществляется с помощью специального робота в сверхвысоком вакууме. Это позволяет, например, в течение нескольких часов исследовать свойства поверхности свободной от газового монослоя. Однако, к настоящему времени нет подтвержденных данных о реальных характеристиках и практических возможностях данного комплекса.

Анализ аппаратного обеспечения наноизмерений ведущих метрологических центров мира позволяет сформулировать ряд принципов, которые должны быть положены в основу создания измерительно-технологического комплекса для обеспечения единства измерений параметров наноструктурированных объектов и материалов.

Повышение точности измерений эталонных установок за счет снижения воздействий внешних шумовых полей на прибор путем экранирования внешних полей и стабилизации параметров окружающей среды.

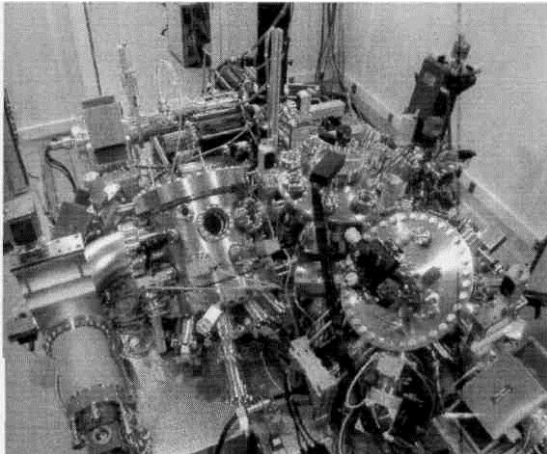


Рис.1 - Установка для создания и исследования наноструктур (NIST, США) включает в себя:

сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) при сверхвысоком вакууме и высокоточном контроле температур -270 до -150 С; сверхпроводящий магнит создающий поле до 10 Т в области зонда; систему молекулярно-пучковой эпитаксии; систему приготовления образцов игольчатого типа для исследования на СТМ; систему транспорта образцов в сверхвысоком вакууме; уникальную систему защиты от внешних физических полей.

Электронный пучок используется для наблюдения структуры образца, ионный пучок используется для создания и обработки образца. В электронном пучке достигается разрешение $- 0,8$ нм. Установка оснащена детекторами позволяющими с высокой разрешением и контрастом наблюдать наноструктуру образца и следовать его состав. В их число входят: - детектор отраженных электронов с селекцией по углу и по энергии; детектор вторичные электроны; - детектор для работы в просвечивающем режиме; - анализ катодoluminesценции; - рентгеновский энергодисперсионный спектрометр; - квадрупольный масс-спектро-метр.

Для исследования атомарной структуры НО в составе измерительно-технологического комплексе целесообразно иметь атомный силовой микроскоп (АСМ). В основе работы АСМ лежит использование сил связей, которые действуют между атомами вещества (рис.3, справа). Если два

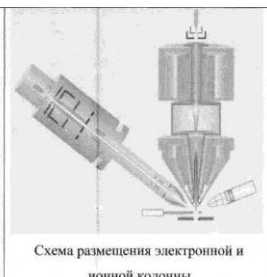


Рис.2 - Установка Cross Beam 1540 – комплекс для создания и исследования нанобъектов

атома находятся на малых расстояниях один от другого (до $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ см), то на них действует сила отталкивания, а если более – то силы притяжения. В приборе применяют алмазную иглу, которая плавно движется над поверхностью образца – сканирует эту поверхность. Подчеркнем, что положительной стороной квантово-размерной (кластерной) теории [1] является то, что в ее рамках легко интерпретируется слабая

зависимость свойств нанокластеров от изменения макроскопических характеристик среды [3,5].

Для исследования НО со сложной трехмерной топологией, в том числе в приложении нанобиотехнологий, в составе измерительно-технологического комплекса метрологического

необходимо иметь конфокальный сканирующий микроскоп.

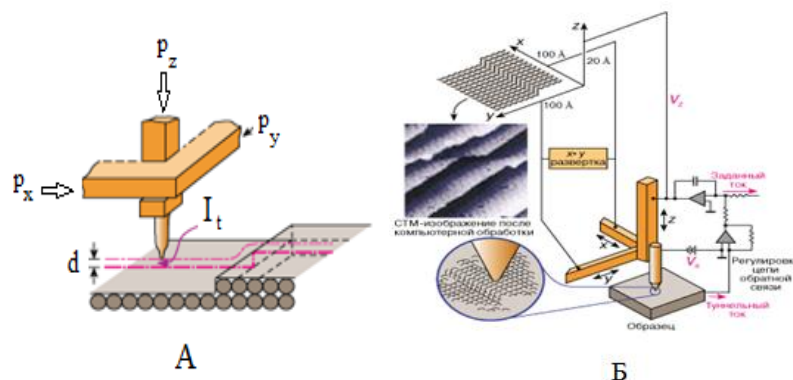


Рис. 3. - (А) - p_x, p_y, p_z – пьезоэлементы; - туннельный вакуумный промежуток между иглойзондом и образцом; I_t - туннельный ток; (Б) - схема, которая иллюстрирует работу атомного силового микроскопа.

Одним из лучших образцов таких приборов является конфокальный сканирующий микроскоп-спектрометр Leica TCS SPE, фирмы Leica Microsystems. Таким образом, оптимальный состав измерительной аппаратуры для обеспечения единства измерений параметров наноструктурированных объектов и материалов в современном представлении должен включать: установку Cross Beam 1540 в полной комплектации; просвечивающий электронный микроскоп Либра 200; ближнепольный микроскоп- спектрометр Jasco NFS-200/300; конфокальный сканирующий микроскоп-спектрометр Leica TCS SPE. Ориентировочная стоимость приборов для создания измерительного комплекса в указанной комплектации составляет около 4,85 млн. евро.

Проведенный выше анализ показывает, что метрологическое обеспечение нанотехнологий и нанопродукции крайне дорогостоящее мероприятие.

Выводы. При переходе к нанотехнологиям возрастает потребность в увеличении точности применяемых средств измерений, что усложняет условия, в которых необходимо проводить измерения. Большая часть измерений должна выполняться в условиях высокого вакуума и, как правило, совмещаться с самим технологическим процессом. При этом требуется создание новых государственных первичных и рабочих эталонов. Поэтому метрологическое обеспечение НТ и нанопродукции требует значительных финансовых затрат. Выделим приоритетные направления развития НТ и нанопродукции, которые позволят обеспечить эффективность расходования средств.

Развитие НТ осуществляется по двум направлениям: «сверху-вниз» - когда с помощью НТ усовершенствуется и улучшается продукция уже существующих технологий (микроэлектронные и информационные технологии, материалы, медицина и т.д.); «снизу-вверх» - когда создаются принципиально новые технологии, например, наномашин, которые осуществляют сборку новой продукции, например, нового материала, непосредственно из соответствующих нанообъектов. Основные достижения НТ на ближайшую перспективу прогнозируются в направлении «сверху-вниз». В ряде стран отрабатываются специальные механизмы направленные на повышение эффективности коммерциализации научных результатов. При этом отмечается важность стандартизации, метрологического обеспечения и оценки соответствия в отработке этих механизмов. Экспертные оценки сценариев развития НТ показывают, что объемы производства НТ к 2015 году составят более 500,0 млрд. \$. Для обеспечения эффективного расходования бюджетных средств в Украине крайне важно определить приоритетные направления развития технологий и НТ, в частности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kovalchuk V.V. Nanoelectronic's material for optic system.// Photoelectronics. - 2012.-№ 21.Р.65-68
2. Блинов Л. М. Ленгмюровские пленки // Успехи физических наук. -1988. - т. 155, № 3. –С. 443-480
3. Cavalcanti A., Shirinzadeh B., Freitas R.A.Jr., Kretly L.C. Medical Nanorobot Architecture Based on Nanobioelectronics// Patents on Nanotechnology. -2009.- №1(1).-P.1–10
4. Drecksler N. C. Assembler Nicks and Nodes and Nanotechnology// Nano Letters.-2002.-v. 1 (1).-P.22–26
5. Сулов А. А., Чижик С. А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) // Материалы, технологии, инструменты. - 2013. - Т.2, № 3.- С.78-89
6. Hullmann A. Trends in Information and Communication Technology on Disability Policy and Practice. National Council on Disability, Washington DC.,2010.-P.1-55
7. Ковальчук В.В. Метрологія формування наносистеми з використанням фрактального підходу.// Метрологія та прилади. - 2012. – № 2 (34). С. 61-65