

В. А. Быков, В. Н. Рябоконт

(Москва)

**ИНСТРУМЕНТЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ:
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ***

Представлены текущее состояние, направления и перспективы разработок инструментов нанотехнологии на основе сканирующих зондовых устройств. Рассмотрены некоторые характеристики сканирующих зондовых микроскопов, зондовых лабораторий и зондовых фабрик. Приведены примеры отечественных разработок зондовых приборов.

Введение. Современная нанотехнология включает в себя процессы «создания и использования материалов, устройств и систем, структура которых регулируется в нанометровом масштабе» [1]. Под инструментами нанотехнологии (ИН) понимается набор приборов, устройств и соответствующих методик, предназначенных для измерений параметров и характеристик исходных материалов и структур, сопровождения и проведения нанотехнологических процессов, метрологического и функционального контроля изготовленных наноэлементов и наноструктур.

Развитие нанотехнологии привело к возникновению науки о наноматериалах и наноинженерии, которые, в свою очередь, требуют соответствующего приборного обеспечения как для фундаментальных исследований, так и для сборочных, диагностических и контрольно-измерительных операций.

Очевидно, что развитие ИН должно по крайней мере не отставать от развития нанотехнологии, а в идеальном случае развиваться опережающими темпами. При этом нужно учитывать большую широту применений ИН: от измерений энергетического спектра квантовых точек до определения прочностных характеристик нанокompозитной брони, от визуализации структуры биомолекул до определения профиля распределения примесей в полупроводниках.

Инструменты нанотехнологии должны представлять собой измерительные комплексы, так как в общем случае наряду с наноразмерными элементами в состав наноустройств входят элементы сопряжения с периферийными устройствами (микроэлектронные элементы), микроэлектромеханические устройства и системы. В нанотехнологии используются также биологиче-

* Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ (государственный контракт № 02.190.11.004), Фонда содействия развитию малого предпринимательства в научно-технической сфере (проекты № 4399, № 4398, № 3724 и др.).

ские и химические методы и объекты (например, биочипы, самоорганизующиеся структуры).

Для измерительных комплексов нанотехнологий характерны: широкий диапазон размеров объектов, высочайшая разрешающая способность и разнообразие используемых методик измерений и воздействий. Связано это с тем, что развитие нанотехнологии идет по разным направлениям с использованием самых различных эффектов: механических, электрических, оптических и других.

Таким образом, инструменты нанотехнологии должны обеспечивать возможность исследовать исходные материалы и структуры, осуществлять контроль технологических процессов, изготовление нанопроизведений, а также производить их функциональный контроль.

Основа инструментов нанотехнологии – зондовые устройства. Какой же тип устройств должен быть положен в основу нанотехнологического инструментария, чтобы обеспечить фундаментальные исследования на атомно-молекулярном уровне, с одной стороны, сборку и функциональную диагностику наноприборов – с другой? Ответ на этот вопрос уже дала практика развития измерительной техники – это зондовые приборы, причем не просто зондовые, но основанные на эффекте близости, «близостные» зондовые приборы. Именно непосредственная близость зонда к исследуемой поверхности позволяет «ощупывать» ее с атомным разрешением (на кончике зонда всегда есть последний атом, который можно использовать в качестве щупа). Это отличие от лучевых зондовых приборов (например, сканирующих электронных микроскопов (СЭМ)) является принципиальным. Во-первых, только такие приборы могут непосредственно регистрировать рельеф исследуемой поверхности. Во-вторых, в отличие от лучевых приборов, где используют высокоэнергетические пучки, здесь субатомного разрешения достигают при минимальном воздействии (силы Ван-дер-Ваальса) на образец, позволяя, например, исследовать распределение плотности электронных состояний по отдельному атому. Вместе с тем диапазон воздействий зондовых приборов на исследуемую поверхность весьма широк, при необходимости они позволяют манипулировать отдельными атомами и проводить измерения прочностных характеристик материалов методом нанопрофилирования.

Еще в 1965 г. была высказана идея о возможности построения профиля исследуемой поверхности путем ее сканирования находящимся в непосредственной близости остроконечного зонда [2]. В процессе сканирования следящая система поддерживает постоянным эмиссионный ток между зондом и поверхностью, при этом управляющий сигнал отслеживает рельеф поверхности. Такой прибор (Troughgrafter) реализован в 1971 г. и продемонстрировал разрешение на уровне 0,3 нм [3]. А в 1982 г. с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) получено изображение поверхности кремния с атомным разрешением [4].

Наконец, следующим чрезвычайно важным шагом в развитии ИН явилось создание сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ), основу которого составил силовой зондовый датчик, в современном виде представляющий собой изготовленную по кремниевой технологии миниатюрную гибкую консоль с остроконечным зондом (рис. 1). В процессе сканирования в результате непосредственного взаимодействия зонда с исследуемой поверхностью консоль изгибается, что позволяет использовать величину изгиба для характеристики степени взаимодействия. При этом величина изгиба может быть использована как для непосредственного расчета профиля ска-

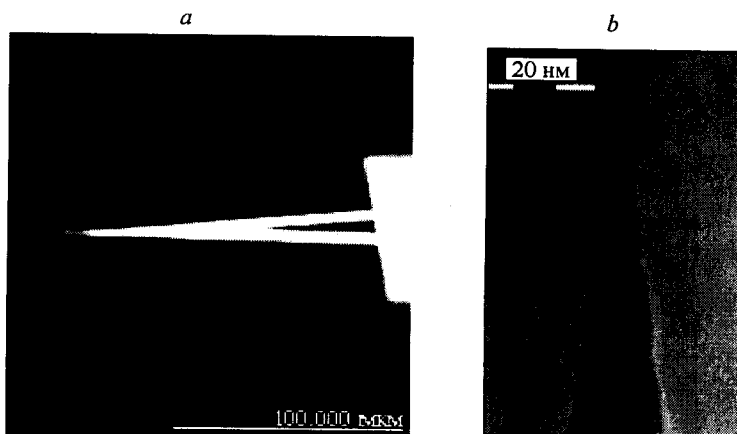


Рис. 1. Зондовый датчик для силовой микроскопии: общий вид (а), острие зонда (b)

нируемой поверхности, так и в качестве входного сигнала системы обратной связи, поддерживающей постоянную величину взаимодействия в процессе сканирования. Очевидно, что взаимодействие зонда с поверхностью может быть не только контактным, но и бесконтактным за счет использования сил Ван-дер-Ваальса, электрических и магнитных взаимодействий, причем не только силовым, но и, например, тепловым, позволяющим проводить измерения самых различных характеристик исследуемых образцов. В настоящее время на основе принципов зондовой микроскопии развита широкая номенклатура приборов, проводящих измерения при температурах от сверхнизких до нескольких сотен градусов Цельсия, в сверхвысоком вакууме, приборов промышленного применения, измеряющих параметры 300-миллиметровых полупроводниковых пластин, и других.

Зондовые микроскопы. Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) в значительной степени могут удовлетворить потребности нанотехнологии. Они позволяют осуществлять исследования и входной контроль исходных материалов, а также изучение изделий нанотехнологии, полученных групповыми методами, например, нанопорошков, наночастиц, наноструктур и наноструктурных материалов, биоструктур.

Модельный ряд Solver PRO (рис. 2) предназначен для многоцелевого использования. Он включает: базовый прибор Solver PRO Basic (рис. 2, а), приборы Solver EC для проведения и исследования локальных электрохимических реакций в жидкости (рис. 2, b), Solver PRO-L для исследований образцов в жидкости контролируемого состава (рис. 2, c), Solver T300 для исследований материалов в условиях повышенных температур до 300 °С (рис. 2, d), Solver MFM для исследований магнитных материалов с возможностью приложения внешнего магнитного поля до 0,2 Тл (рис. 2, e).

Определяющим элементом СЗМ является сканер, перемещающий зондовый датчик вдоль исследуемой поверхности, именно от него зависят разрешение и размер получаемого изображения. Изготавливаются сканеры на основе пьезокерамики. В современных СЗМ сканеры снабжаются датчиками положения, например, емкостными, которые позволяют существенно уменьшить ряд недостатков пьезокерамики: наличие гистерезиса, ползучесть, нелинейность передаточных характеристик.

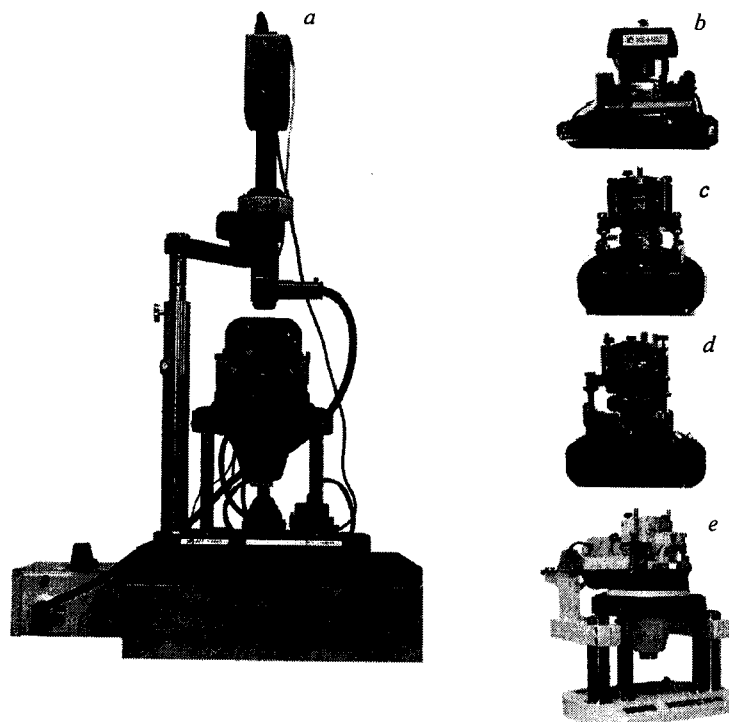


Рис. 2. СЗМ модельного ряда Solver PRO: Solver PRO Basic (a), Solver EC (b), Solver PRO-L (c), Solver T300 (d), Solver MFM (e)

Ближайшие перспективы развития СЗМ связаны с использованием многозондовых датчиков, картриджей. В настоящее время, для того чтобы провести прецизионные исследования рельефа, нанолитографические операции, измерения электрических и магнитных характеристик, необходима замена зондовых датчиков. Это не только снижает производительность прибора, но и ограничивает полноту информации вследствие того, что очень трудно провести на одном и том же участке исследуемой поверхности разнородные измерения со сменой зондовых датчиков, поскольку после осуществления процедуры смены датчика практически невозможно привести зонд в ту же начальную точку. Многозондовый датчик с набором разнотипных зондов («цветной» картридж) с вполне определенным расстоянием между ними в значительной степени снимает эту проблему. Многозондовость необходима также и для решения задачи повышения производительности измерительных и нанотехнологических операций. Наконец, интенсивно ведутся разработки активных зондовых датчиков со встроенными в них измерительными и функциональными устройствами, например, датчиков-актюаторов, в том числе снабженных «суставами», датчиков со встроенными электронными элементами.

Зондовые лаборатории. СЗМ – это приборы для определенного класса применений ограниченного, хотя и очень большого, числа измерительных методик. Естественным расширением возможностей СЗМ является использование дополнительных оптических методик измерений, а также методик,

позволяющих проводить измерения локальных характеристик по объему образцов. Кроме того, для нанотехнологических применений желательно расширить пределы и увеличить производительность измерений. Для этого зондовые приборы дополняются оптическими методиками и лучевыми зондовыми приборами, в частности сканирующими конфокальными оптическими и электронными микроскопами. Измерительные комплексы такого типа уже являются сканирующими зондовыми лабораториями (СЗЛ).

Один из примеров такой СЗЛ – прибор Nanofinder, сочетающий в себе СЗМ, сканирующий ближнепольный оптический микроскоп (СБОМ), лазерный конфокальный микроскоп (ЛКМ), рамановский и люминесцентный спектрометры (рис. 3).

Предельное оптическое разрешение СЗЛ Nanofinder достигает 50 нм и определяется оптическим разрешением СБОМ. Более высокое разрешение, сравнимое с разрешением обычного СЗМ, позволяет получать новейшая СЗЛ Solver NTF-Raman, имеющая в составе СБОМ безапертурную измерительную головку, в которой информационное оптическое излучение генерируется непосредственно под кончиком зонда СЗМ. Это дает возможность проводить измерение оптических, в том числе и спектральных, характеристик.

Ближайшей перспективой создания приборов такого класса является разработка комбайна с включением в его состав сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), что позволит получать как обзорные изображения наноструктур с достаточно высоким разрешением, так и комплекс СЗМ-данных с нанометровым разрешением, при этом комбайн должен обладать полным набором оптических измерений.

Зондовые фабрики. Практически все, о чем упоминалось выше, относится к измерениям характеристик и параметров наноизделий. Вместе с тем после первых работ по применению зондовой микроскопии появились сообщения использовать СТМ для воздействия на поверхность объекта с целью ее модификации на уровне вплоть до атомарного. Яркий пример – надпись “IBM” атомами Хе на поверхности атомарно-чистой платины [5]. Уже во второй половине 80-х годов начались интенсивные работы по созданию запоминающих сред с элементами записи атомно-молекулярного уровня [6]. Были созданы также и активные элементы, например одноэлектронный транзис-

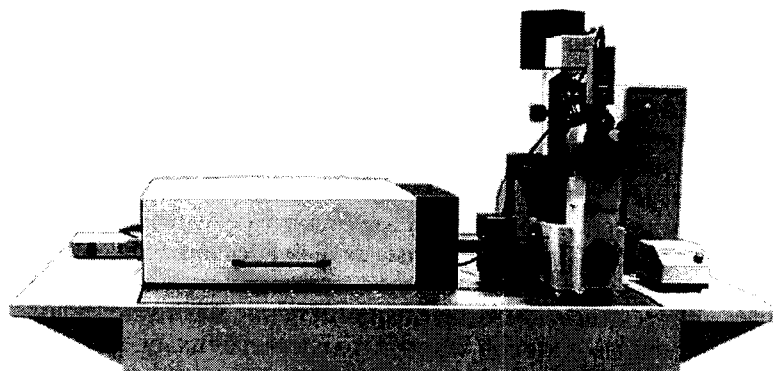


Рис. 3. Сканирующая зондовая лаборатория Nanofinder

тор [7]. Практически каждый современный СЗМ обладает теми или иными нанолитографическими возможностями модификации поверхности с нанометровым разрешением. Однако они не обладают достаточной производительностью и, кроме того, функционально неполны, поэтому необходима возможность проведения дополнительных операций, групповых или локальных, например: травления поверхности, нанесения различных металлических и диэлектрических покрытий, в частности защитных.

Задача повышения производительности решается несколькими путями. Прежде всего, это – многозондовость. Примером могут служить многозондовые головки записи–считывания терабитных запоминающих устройств, в частности, запоминающего устройства Millipede с матрицей 32×32 микромеханических зондовых устройств записи–считывания (разрабатывается матрица 64×64) [8]. Повышение производительности обеспечивают также и за счет повышения быстродействия отдельных зондовых датчиков, например, введением в них управляемых пьезоэлементов, превращающих каждый зондовый датчик фактически в миниатюрный зондовый актюатор [9].

Наконец, следует обратить особое внимание на существенный прогресс ионно-лучевых технологий [10]. Они позволяют производить прецизионные операции ионного травления и напыления с разрешением до 5 нм, при этом число возможных ионных источников достигает примерно трех десятков, включая ионы металлов, полупроводников и инертных газов. Можно предположить, что следующее поколение зондовых приборов для нанотехнологии – зондовые фабрики – будет создаваться уже на основе комплексов, включающих многозондовые быстродействующие устройства, СЭМ и ионно-лучевые установки (ИЛУ) высокого разрешения. Определенным прообразом системы СЭМ + ИЛУ является разработанная для нанотехнологических применений установка Nova 600 NanoLab [11], включающая электронный микроскоп и прецизионные ионно-лучевые источники травления и напыления с разрешением до 7 нм.

Информационно-вычислительная среда. Существенная особенность нанотехнологии – интегрирование знаний от атомного уровня, электронных свойств и квантово-механического описания до свойств механических структур и электронно-вычислительных систем. В этом она существенно превосходит по сложности, например, микроэлектронную технологию.

Первая группа проблем, возникающих при исследовании свойств образцов на нанометровом уровне, связана с интерпретацией полученных данных, с сопоставлением наблюдаемых величин и локальных свойств измеряемых структур. Усугубляется ситуация тем, что локальные свойства на нанометровом уровне могут в общем случае не соответствовать как достаточно хорошо известным объемным свойствам полученных традиционными методами измерений, так и свойствам отдельных атомов и молекул. Поэтому появляются новые разделы науки: наномеханика, нанооптика, нанохимия, нанобиология и другие. Нужна разработка соответствующих теоретических моделей, на основе которых можно решать обратные задачи восстановления свойств образца по комплексу измеренных в соответствии с определенной методикой величин. Хорошим примером является применение магнитно-силовой микроскопии, с помощью которой проводятся измерения пространственных распределений первой и второй производных магнитного поля, а также их изменений под воздействием внешнего поля, в то время как реально пользователя интересует доменная структура образца. И только моделирование позволяет сопоставить измеренным распределениям характеристик магнитно-

го поля наиболее вероятную структуру доменов. Такой подход относится, вообще говоря, ко всем измеряемым с помощью СЗМ характеристикам. Впрочем, при измерениях с предельными разрешениями это относится и к другим методам измерений, в частности оптическим.

Существуют также проблемы сравнения данных, полученных с помощью зондовых приборов. В первую очередь это относится к сканированным изображениям, полученным на разных приборах, разными зондами, при разных настройках приборов, в разных местах и в разных условиях.

В обычных условиях, «на воздухе», как на поверхности образца, так и на поверхности кончика зонда присутствует слой адсорбата, который, как правило, не сплошной, что вносит искажения в изображения, получаемые с помощью некоторых методик.

Даже в условиях атомарно-чистой поверхности образца, например, в сверхвысоком вакууме, существует проблема сопоставления изображений атомно-молекулярного разрешения. Связано это с тем, что в используемых в широкой практике зондах форма кончика атомарно не определена.

Необходимо также учитывать, что данные СЗМ-измерений – это не отдельная картинка, а целый набор сканированных изображений и спектроскопических данных (силовых, токовых и оптических), полученных по разным методикам. Такой набор представляет собой совокупность свойств образца: характеристики рельефа, распределение локальных наномеханических, электрических (распределения потенциала, тока растекания, локальной емкости и т. д.), магнитных, оптических, адгезионных и других параметров. Выделение значимых объектов на изображениях, их интерпретация и сравнение друг с другом в полной мере возможны только с применением самой современной вычислительной техники.

Учитывая сложность выбора оптимальных методов, методик и режимов проведения измерений, а также интерпретации полученных результатов, в помощь операторам разрабатываются мощные экспертные системы. Такие системы на основе мощных баз данных, пополняемых сообществом пользователей зондовых устройств, в соответствии с объектом измерений и воздействием выбирают методы и режимы измерений, минимизирующие появление артефактов в изображениях, а также в зависимости от свойств исходных структур и получаемых нанообъектов выбирают адекватные методы и режимы нанотехнологических воздействий. Затем, уже на основе библиотек моделей процессов измерений и наномодификаций, интерпретируют полученные результаты и адекватно их представляют. Получение, интерпретация, обработка, анализ и хранение таких данных осуществляются с привлечением мощных вычислительных устройств.

Для современных нанотехнологий характерна тенденция, когда зондовые приборы интегрируются в мощную высокопроизводительную информационно-вычислительную среду посредством Интернет-сети, так называемую информационно-вычислительную среду (ИВС) нанотехнологии.

Таким образом, эффективность развития нанотехнологии определяется сопутствующим развитием глобальной ИВС. Поиск уже имеющейся информации бывает более эффективен, чем экспериментальное получение каждый раз новых данных, их интерпретация и т. д. Каждое рабочее место исследователя должно быть включено в единую ИВС.

Работы в этом направлении уже проводятся. Проектом предусматривается, что непосредственно с рабочего компьютера перед проведением процесса измерений пользователь сможет обратиться к ИВС, указав модель исполь-



Рис. 4. Учебный сканирующий зондовый микроскоп Nanoeducator

зубого прибора, тип образца, подлежащего СЗМ-исследованиям, и набор интересующих его параметров. В ответ ИВС выдает данные об уже проведенных аналогичных измерениях и рекомендации по конфигурированию прибора, методам измерений и соответствующим настройкам и режимам работы прибора. По результатам измерений ИВС поможет провести обработку данных, определить область достоверности значений измеренных величин и на основании моделей провести расчеты параметров образца, а полученные данные и результаты их обработки внести в БД ИВС.

Наконец, важной частью работы по созданию благоприятной среды для развития нанотехнологии является разработка учебного сканирующего зондового микроскопа типа Nanoeducator (рис. 4). Его особенностью является возможность реализации основных методик зондовой микроскопии. При этом в качестве зонда используется легко затачиваемая электрохимическим травлением металлическая игла, что до минимума сводит расходы на его эксплуатацию. Такой СЗМ не содержит лазерных излучателей, что значительно повышает его безопасность, кроме того, как показала практика применения этих приборов, они достаточно устойчивы к поломкам. Сеть учебных классов на основе СЗМ Nanoeducator позволит сравнительно быстро подготовить поколение научных и инженерных кадров, способных активно включиться в развитие нанотехнологии.

Заключение. Таким образом, можно заключить, что инструментальная база нанотехнологии в современном понимании включает большую группу комбинированных устройств, интегрирующих в себя методы СЗМ, оптической спектроскопии, лучевые методы с мощным, интеллектуально наполненным сетевым программным обеспечением. Дальнейшее развитие инструментов нанотехнологии должно привести к открытию принципиально новых возможностей для экспериментаторов и технологов.

Аналитические методы будут интегрироваться с технологиями молекулярно-лучевой эпитаксии, CVD-технологиями, технологиями самосборки и самоорганизации, что переведет нанотехнологию из научных лабораторий в промышленность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований: Пер. с англ. /Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002.
2. **Young R. D.** Field emission ultramicrometer // *Rev. Sci. Instrum.* 1966. **37**. P. 275.
3. **Young R., Ward J., Scire F.** The Topografiner: an instrument for measuring surface microtopography // *Ibid.* **43**. P. 999.
4. **Binnig G., Rohrer Y.** Scanning tunneling microscopy // *Helv. Phys. Acta.* 1982. **55**. P. 726.
5. **Eigler D. M., Schweizer E. K.** Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope // *Nature.* 1990. **344**. P. 524.

6. А. с. 165240 СССР. Постоянное ЗУ и способ записи /А. В. Емельянов, Э. А. Полторацкий, Н. С. Самсонов.
7. **Matsumoto K., Ishii M., Segawa K. et al.** Room temperature operation of a single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nanooxidation process for the TiO_x/Ti system // Appl. Phys. Lett. 1996. **68**. P. 34.
8. **Vettiger P., Cross G., Despont M. et al.** The “millipede” – nanotechnology entering data storage // IEEE Trans. Nanotechnology. 2002. **1**. P. 39.
9. **Sulchek T., Minne S. C., Adams J. D. et al.** Dual integrated actuators for extended range high speed atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1999. **75**. P. 1637.
10. **Tseng A. A.** Recent developments in micromilling using focused ion beam technology // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**. P. R15.
11. http://www.feic.com/products/nova600_nanolab.htm

ЗАО «Нанотехнология МДТ»,
E-mail: vbykov@ntmdt.ru

Поступила в редакцию
2 февраля 2004 г.

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!