

## НАНОТЕХНИКА – ПУТЬ К НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ

**Р.Р. Бабаян (ИПУ РАН)**

*Появление микросистем на базе нанотехники, их глобализация позволят совершить новую научно-техническую революцию, создать качественно более высокий индустриальный и социальный базис и обеспечить необходимый уровень военной готовности.*

Вторая половина XX века ознаменовалась второй научно-технической революцией, открывшей постиндустриальный этап развития цивилизации. Темпы вхождения в этот этап иллюстрирует закон Мура, сформулированный в связи с развитием микроэлектроники. Теоретически недоказанный этот закон, первоначально предсказавший удвоение реализуемой степени интеграции компонентов внутри чипов интегральных схем (ИС) каждые 18 мес., оказался применимым и к росту достижимой производительности ЭВМ, и к ряду других показателей, характеризующих так называемые "критические" технологии. В конце 90-х годов XX века "критическими" стали молекулярная биология, микроэлектромеханика (MEMS) и микросистемная техника. В наше время закону Мура для "критических" технологий стали удовлетворять такие "прорывные" сферы приложения усилий передовых стран, как наноиндустрия и "открытое" образование (E-learning). Перечисленные области деятельности характеризуются ежегодным удвоением объема капиталовложений в развитых странах и в ряде случаев наличием приоритетных целевых национальных программ. Поэтому есть основания считать закон Мура экономическим правилом, описывающим динамику развития наукоемких сфер человеческой деятельности.

Наноиндустрия как универсальная и наукоемкая область – это путь к третьей, невиданной по своему размаху научно-технической революции, которая изменит облик мира уже к концу первого десятилетия XXI века. Наноиндустрия базируется на технологическом, машиностроительном, производственном и научно-информационном обеспечении процессов, связанных с манипуляциями атомами и молекулами. Квантовый характер нанотехнологических процессов делает их в высшей степени наукоемкими и стимулирует развитие таких научных направлений, как атомно-молекулярный дизайн, вычислительные разделы химии, физики, биологии, электроники, многоуровневое математическое моделирование.

Термин "нанотехника" является наиболее точным русским эквивалентом английского словосочетания Nanotechnology. Первая часть этого словосочетания – "нано" обозначает  $10^9$  (одна миллиардная часть метра). Варианты второй части термина – техника, технология, несмотря на известные различия в русско-

язычном их понимании, для нанобласти практически пока являются синонимами. Обозначения наноразмеров – не самое главное в нанотехнике. Принципиальным является именно квантовый характер нанообъектов и нанопроцессов и уникальная возможность целенаправленной сборки веществ на атомно-молекулярном уровне. Наномир бросает вызов большинству привычных представлений о характере физико-химических превращений вещества, об их свойствах и возможностях использования.

### Предыстория нанотехники

К почти взрывным темпам развития, наблюдаемым в течение последних 3 лет, нанотехника пришла после более чем полувекových исследовательских усилий. В 1928 г. Г.А. Гамов, в то время сотрудник Ленинградского технологического института, исследуя строение атомного ядра и явление радиоактивности, разработал основы теории туннельного переноса заряда [1]. В 1959 г. Нобелевский лауреат Р. Фейнман написал фразу, воспринимаемую сейчас как пророчество: "Насколько я вижу, принципы физики не запрещают манипулировать отдельными атомами". Эта мысль прозвучала, когда начало постиндустриальной эпохи еще не было осознано; в те годы не было ни интегральных схем, ни микропроцессоров, ни ПК.

В 1966 г. Р. Янг предложил идею пьезодвигателей, которые ныне обеспечивают позиционирование и перемещение подложки под острием туннельного зонда сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) и нанотехнологического оборудования с точностью  $0,1... 0,01 \text{ \AA}$ .

В 1982 г. Г. Бининг и Г. Рорер запатентовали первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Действие СТМ основано на туннелировании электронов через вакуумный барьер – зазор между зондом (острозаточенной иглой) и подложкой, соизмерим с длиной волны электрона. Например, зазор  $L = 5 \text{ \AA}$  составляет около двух диаметров атома углерода. Величина зазора резко влияет на величину туннельного тока (изменение зазора на  $1 \text{ \AA}$  изменяет ток в 10 раз), что позволяет реализовать следящую систему, работающую на поддержание постоянства этих величин.

Техника современных пьезоманипуляторов обеспечивает минимальный шаг (точность позиционирова-

ния) порядка  $0,1 \text{ \AA}$ , что определяется в основном использованием 20-разрядных СБИС аналого-цифровых преобразователей. Величина усиленного туннельного тока ("сигнала ошибки") прямо связана с рельефом поверхности под зондом. С учетом выбранного масштаба сканирования на экране компьютера можно получить изображение (скан) рельефа участка поверхности, местоположение которого выбирается с точностью  $0,1 \text{ \AA}$  относительно опорной (реперной) точки. Таково же возможное разрешение деталей рельефа, позволяющее разглядеть наноразмерные объекты и даже отдельные атомы и молекулы поверхности подложки.

В 1986 г. появился сканирующий атомно-силовой микроскоп (AFM) [2], который в отличие от СТМ основан на контакте поверхности с подвижным зондом или балкой (кантилевером) и измерении отклонения зонда [3]. Развитие техники СТМ и AFM привело к появлению большого ассортимента зондовых микроскопов-инструментов, ставших в наше время арсеналом нанотехники.

Наконец, в 1987-1988 гг. в НИИ "Дельта" была продемонстрирована в действии первая отечественная нанотехнологическая установка, где осуществлялась направленная термическая десорбция частиц с острия зонда [4]. Усовершенствованные модели этой установки и сейчас работают в России.

#### Базовая системная концепция

Базовая системная концепция, позволившая осмыслить перечисленные достижения, была предложена в 1985 г. в книге Э.Дрекслера "Машины созидания". Под таким названием он ввел в рассмотрение молекулярные самовоспроизводящиеся роботы, способные производить сборку молекул, их декомпозицию, запись в память нанокomпьютера программ воспроизведения и, наконец, реализацию этих программ (т.е. самовоспроизведение, размножение). Этот, первоначально рассчитанный на многие десятилетия прогноз пути развития нанотехники к всеобщему удивлению оправдывается с существенным опережением по времени. Проводимые с 1989 г. ежегодные Форсайтовские конференции год за годом фиксировали это опережение.

На одной из первых таких конференций было принято обращение к ученым и правительствам — не проводить наноразработки в военных целях. К сожалению, погоня за ассигнованиями стимулировала нанопрограммы развития средств вооружения, а также изделий двойного назначения, главным образом в США, где несколько таких разработок уже находятся на вооружении армии.

#### Первые шаги нанотехники

В 1990 г. с помощью СТМ фирмы ИВМ название последней было нанесено 35-ю атомами ксенона на грани кристалла никеля. Это имело характер научной сенсации, поскольку присутствие или отсутствие на подложке постороннего атома можно интерпретиро-

вать как логический символ (TRUE/FALSE). Вместе с тем, эксперимент, проведенный в условиях глубокого вакуума при криогенной температуре, носил сугубо демонстрационный характер: все 35 атомов, будучи химически несвязанными с подложкой, поз- же "убежали" со своих мест.

Однако дальнейшие исследования, в том числе в России, уверенно подтвердили возможность валентного "закрепления" атомов на поверхностях различных материалов без какого-либо применения криогенной техники. Варианты химических реакций, позволяющих осуществлять "рисунки" из атомов, подробно описаны в литературе. В 1997 г. стало ясно, что прогноз Дрекслера относительно возможности сборки атомов оправдывается на несколько десятилетий раньше, и эта сборка возможна уже в ближайшие годы.

#### Первые наноматериалы и наноблоки

В 1985 г. были открыты фуллерены [5]<sup>1</sup> — это разновидность молекулы углерода (C<sub>60</sub>), состоящая из 60 атомов, расположенных на сфере.

Молекулы C<sub>60</sub>, названные "букминстерфуллеренами" в честь архитектора — авангардиста, философа и поэта Букминстера Фуллера, иногда называют также "буки-болс". Их шарообразное строение напоминает футбольный мяч и они могут образовывать кристаллы так называемых фуллеритов с гранцентрированной кубической решеткой и достаточно слабыми межмолекулярными связями. Межатомные полости фуллеритов могут заполняться посторонними атомами (щелочных металлов, этиленом и др.).

Число атомов в молекуле углерода может быть существенно больше 60. Например, могут быть получены молекулы C<sub>>10000000</sub> [6], представляющие собой одностенные трубки с диаметром 1,1 нм, длиной в несколько десятков микрон и обнаруженные как побочные продукты синтеза фуллеренов C<sub>60</sub>. Одностенная углеродная нанотрубка представляет собой свернутую в виде цилиндра ленту с упаковкой атомов по типу графита. На базе нанотрубок получают наноматериалы с разнообразными, зачастую уникальными свойствами. Благодаря разнообразию присадок, число вариантов фуллереновых материалов (полупроводников, металлов, ферромагнетиков, полимеров) исчисляется тысячами [6]. Поэтому фуллереновые и фуллеритовые соединения могут считаться строительными трехмерными наноблоками. Зависимости электрических свойств нанотрубок от геометрических параметров были предсказаны на основе квантово-химических расчетов их зонной структуры. Эти зависимости были экспериментально подтверждены в 1998 г. На основе нанотрубок можно строить электронные компоненты, механические приводы, шестеренки и т.п. изделия, предсказанные с помощью методов молекулярного моделирования. Так зубьями шестеренок могут служить бензолные кольца, "приделанные" к углеродным нанотрубкам. Механи-

<sup>1</sup> Н.Крто, R.Curl, R. Smalley — авторы этого открытия в 1995 г. стали Нобелевскими лауреатами.

ческие приводы подобного рода обладают достаточной прочностью и работают при частоте до 1011 об./с. В литературе описаны такие молекулярные насосы [7]. Для считывания информации из атомной памяти служит зонд, состоящий из нанотрубки, на конец которой насажен фуллерен, соединенный с молекулой пиридина. Такой зонд "осматривает" поверхность алмазоподобной подложки, которая сама по себе обычно покрыта слоем атомов водорода. Часть этих атомов может быть "искусственно" заменена атомами фтора, что и означает запись информации. Взаимодействия пиридина с водородом и фтором настолько различаются, что эта разница без труда фиксируется туннельным микроскопом. Сканируя поверхность, СТМ считывает записанные предикаты.

Отсюда видна необходимость многозондовой системы сканирования. Работы в этом направлении уже дали первые результаты в виде решетки, состоящей из  $12 \times 12 = 144$  зондов. В 2005 г. сообщалось об экспериментальном образце из 1024 зондов. Если группы зондов расположить, например, на расстояниях в два периода решетки кремния друг от друга (1 нм), то на чипе удастся разместить память объемом в несколько терабайт. Таким образом, нанотрубки, из которых можно строить зонды для СТМ, а также электронные компоненты, имеют шансы стать материалами будущего.

#### От исследований к наноиндустрии

С 1998 г. темпы развития нанотехники стали резко нарастать. В частности, в Японии нанотехнология определена как вероятная технологическая категория XXI века, а японское правительство агентством MITI (Ministry of International Trade and Industry), как следует из отчета НАСА, имеет Правительственную программу нанотехнологических исследований Astroboy (10-летней, с бюджетом 200 млн. долл. США), предусматривающую создание наноразмерной элементной, приборной и системной базы электроники, способной работать в диапазоне температур от нескольких градусов Кельвина до  $3000^{\circ}\text{C}$  в условиях, существующих на поверхности планет, в Космосе и при ядерных взрывах.

Вслед за японской национальной программой Конгрессом США была утверждена Американская нанотехнологическая инициатива, которая предусматривает следующие направления работ:

- создание мультитерабитных запоминающих устройств объемом около  $1\text{см}^3$ , емкостью с библиотеку Конгресса США, при увеличении плотности записи информации в тысячи раз;
- создание материалов и изделий методом сборки атомов, что позволит сберечь природные ресурсы и потребует меньшего расхода материалов;
- создание материалов для применения во всех видах воздушных и космических аппаратов (более легких, более экономичных и в 10 раз более прочных, чем нынешние);

- увеличение в 1000000 раз быстродействия компьютеров по сравнению с Pentium III;
- использование генной инженерии для распознавания канцерогенных клеток и их лечения методами наноинженерии;
- улучшение очистки воды и воздуха;
- увеличение эффективности солнечных батарей не менее чем в 2 раза. На исполнение этой программы бюджетом США в 2000 г. было выделено 497 млн. долл. США (18% расходов на федеральную поддержку науки). На порядок больше средств вкладывают в развитие нанотехнологий частные фирмы США, Японии и других развитых стран. Эти ассигнования ежегодно удваиваются.

#### Прогнозы экспертов

В 1997 г. Р. Смоли, Лауреат Нобелевской премии 1996 г. в области химии, предсказал сборку атомов уже к 2000 г. и к этому же времени спрогнозировал появление первых коммерческих наноизделий. Этот прогноз оправдался. Интересны и другие его прогнозы. Например, что к 2010 г. станет возможна молекулярная хирургия и ремонт биологических клеток, то есть путь к самовоспроизводству молекулярных биороботов антистарению и даже бессмертию.

К 2010-2015 гг. специалисты предсказывают создание первых образцов нанокomпьютеров, а к 2010 г. биологи считают вероятным появление моделей сложных белковых образований, которые позволят синтезировать гены для воспроизводящих себя молекулярных биороботов. Препятствия для создания этих моделей лежат не в биологии, а в информатике. Это — недостаточная вычислительная мощность существующих сейчас супер-ЭВМ. Алгоритмы такого моделирования биологам известны.

Отечественные работы по суперкомпьютерному моделированию белковых структур подтверждают реальность разгадок многих тайн живой природы уже в ближайшем десятилетии.

#### Список литературы

1. *Гамов Г.А.* Стрoение атомного ядра и радиоактивность. Гостехтеорфизиздат, Москва-Ленинград, 1932.
2. *G.Binning, Quate G.F., Gerber Ch.* Atomic force microscopy, J.Phys.Rev.lett. 1986. vol.56.
3. *Прангишвили И.В.* Нанотехнологии могут во многом опрeделить развитие человечества // Приборы и системы управления. 1998. № 4.
4. *Никишин В.И., Лускинович П.Н.* Нанотехнология и наноэлектроника // Электронная промышленность. 1991. № 3.
5. *H.Kroto, J.Heath, S.O'Brien, R.Curl, R.Stalley,* Nature, 318, 1985.
6. *Еленин Г.Г.* Нанотехнологии и вычислительная математика. В сб.: Математическое моделирование нанотехнологических процессов и наноструктур/Тр. науч. семинара, вып.1, ISBN 5-7262-0368-2. Москва, МИФИ, 2001.
7. *Drexler K.E.* Building molecular machine systems. Trends in Biotechnology. 1999. v.17. № 5.

*Бабаян Роберт Рубенович — д-р техн. наук, Институт проблем управления РАН.  
Контактный телефон (495) 334-93-01.*