

# ИНСТРУМЕНТЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

В.А. Быков



**В.А. Быков**, Генеральный директор компании НТ-МДТ, зам. директора по науке НИИФП им. Ф.В. Лукина, Лауреат Правительственной премии РФ в области науки и техники, д-р техн. наук

*К нанотехнологическим исследованиям (НТ) принято относить изучение или контролируемое воздействие на объекты размером меньше  $10^{-7}$  м. Несомненно, в этой сфере качественный рывок произойдет только тогда, когда появится возможность создавать материалы и устройства, в которых в процессе производства будет известно и точно задано положение каждого атома.*

Уместно говорить не о НТ вообще, а о технологиях и производствах с атомарной точностью (ТАТ и ПАТ). В рамках небольшого материала практически невозможно дать полный обзор атомарно-точных технологий и проанализировать вероятные сценарии их развития (как существующих, так и будущих), однако представляется целесообразным на достаточно простых примерах показать, почему НТ изменят мировую экономику, а также отметить наиболее важные тенденции в создании «инструментов нанотехнологий» — научного и производственного оборудования, которое позволит коммерциализовать появляющиеся возможности.

Разумеется, на всех отраслях экономики положительно отразится создание новых материалов, но именно в трех направлениях количественные изменения достаточно быстро перерастут в качественные, способные изменить техносферу и преобразить повседневную жизнь людей. Это энергетика, информационные технологии и медицина.

## Энергетика

**Топливный элемент** — устройство для преобразования химической энергии в электрическую. По мнению экспертов, наиболее перспективными являются энергетически высокоэффективные и экологически безопасные топливные элементы на полимерной электролитической мембране.

Однако существует ряд сложностей: низкая, по сравнению с теоретической, эффективность преобразования энергии; большое количество платины в используемых катализаторах и их нестабильность в долговременных рабочих циклах. Эти сложности, с большой вероятностью, удастся преодолеть с помощью ТАТ, в частности, при исполь-

зовании малых металлических наночастиц диаметром 2–5 нм с монокристаллической структурой без ступенек и изломов. Каталитические свойства таких частиц существенно отличаются от свойств массивных материалов вследствие поверхностных эффектов и квантовых ограничений. Укладка с атомарной точностью катализатора или каталитического модификатора на высокоупорядоченные грани наночастицы-подложки может значительно улучшить эффективность топливной системы, а также имитировать каталитические свойства платины в материале гораздо меньшей стоимости.

**Устройства преобразования солнечной энергии** — в этом направлении пока доминируют кремниевые фотоэлементы, КПД которых может превышать 20%, однако они дороги в производстве и быстро стареют. Им на смену в ближайшем будущем могут прийти органические фотоэлементы на основе наноструктур, имеющие сейчас КПД около 5%, однако солнечные батареи с такими фотоэлементами могут иметь значительные размеры, быть гибкими, долговечными и, главное, дешевыми.

**Искусственное освещение** — традиционные технологии чрезвычайно неэффективны, так как в них свет генерируется как побочный продукт энергопотребляющих процессов. Радикальное улучшение может быть достигнуто при использовании твердотельных осветительных элементов. Принцип их действия заключается в прямом преобразовании в полупроводниковом устройстве электрической энергии в световую. Пока эффективность такого преобразования у этих элементов гораздо ниже 100%, но она растет быстрыми темпами, и каких-либо физических ограничений, препятствующих

достижению высокого КПД генерации белого света, не обнаружено.

## Информационные технологии

Внедрение и развитие ТАТ в сфере информационных технологий проявится, прежде всего, в минимизации электронных устройств, увеличении плотности хранения информации, росте пропускной способности волоконно-оптических сетей, повышении эффективности электронно-оптических, оптоэлектронных и нелинейно-оптических преобразователей.

**Полупроводниковая элементная база** — ее дальнейшее совершенствование сдерживается статистическими флуктуациями в концентрации имплантированных ионов примеси, определяющей электронные свойства транзисторов в чипе. ПАТ, несомненно, позволит предложить несколько вариантов решения проблемы:

- синтез транзисторов традиционной структуры, но с АТ-позиционированием атомов примеси;
- синтез атомарной точности (АТ-синтез) необычных активных устройств, таких как транзисторы на углеродных нанотрубках. Возможная альтернатива — использование в качестве полупроводника планарного графена;
- АТ-синтез усилительных устройств, не являющихся прямыми аналогами транзисторов, как, например, молекулярный туннельный диод с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

## Информационные системы

Существенный прогресс ожидается в развитии оптических микрополостей на чипе — кольцевых волноводов, способных хранить и направлять фотоны, удовлетворяющие оп-

ределенным условиям резонанса. Подобные структуры имеют диаметр порядка нескольких десятков микрон. Время хранения фотона определяется добротностью микрополости  $Q$ . При номинальных значениях  $Q$  порядка  $10^{10}$  фотоны могут удерживаться в течение нескольких микросекунд, а длина их эффективного пути — несколько километров, причем с увеличением добротности полости растет и длина эффективного пути в волноводе.

Предел добротности современных микрополостей на чипе ограничен дефектами материала и шероховатостью поверхности стенок волновода. Обеспечив бездефектность материалов, атомарную гладкость стенок волноводов и возможность изготовления высокодобротных микрополостей с объемами, многократно меньшими, чем достижимые сегодня, АТ помогут достижению сверхвысоких  $Q$ . Этот подход сможет обеспечить существенный прогресс в таких областях, как:

- компактные низкопороговые лазеры;
- квантовая информация: при повышении добротности можно увеличить время сильного когерентного взаимодействия излучения с захваченными атомами, необходимое для точного преобразования информации из атомной логики в оптическую;
- оптическая информация: использование высокодобротных микрополостей уменьшает время переключения и усиливает вклад нелинейных взаимодействий, необходимых для реализации быстродействующей, полностью оптической обработки информации.

## Медицина

**Прицельная доставка лекарств.** Упаковка с атомарной точностью действующего компонента позволит оптимизировать процесс его высвобождения, а распознавание с помощью точных межмолекулярных взаимодействий «неправильных» клеток гарантирует высвобождение лекарства там, где оно необходимо.

**Биосовместимые материалы и искусственные ткани и органы.** Формально исследования в этой области не требуют АТ, однако моделирование на молекулярном уровне процессов, происходящих на стыке живой и искусственной материи, позволит существенно ускорить разработку клинически эффективных подходов. При использовании ПАТ-технологий, возможно, появится потенциал создания систем, существенно превосходящих по характеристикам биологические подсистемы здорового человека. Например, уже проведено теоретическое



**Рис. 1.** Зондовая НаноЛаборатория ИНТЕГРА Терма – АСМ со сниженным уровнем термодрейфов

исследование «респираторов» — микромерных АТ-систем для транспортировки кислорода с эффективностью на два порядка выше, чем у эритроцитов.

**Интеграция различных систем человека с электронными (информационными) сетями.** В некоторых странах для мониторинга состояния здоровья престарелых граждан уже реализованы встроенные чипы-анализаторы, посылающие через мобильный телефон на дистанционный пульт информацию об уровне глюкозы в крови.

Есть примеры успешной интеграции «кремниевый чип — нервная клетка», однако в реализации комплексного подхода связи всей нервной системы с электроникой пока остается много трудностей, связанных в основном с недостаточным пониманием принципов организации информационной системы живого организма.

## Технологии атомарной точности

Краткий обзор перспектив использования продукции ТАТ подводит к пониманию

важности оборудования для разработки, производства и тестирования такой продукции, т.е. «инструментов нанотехнологий».

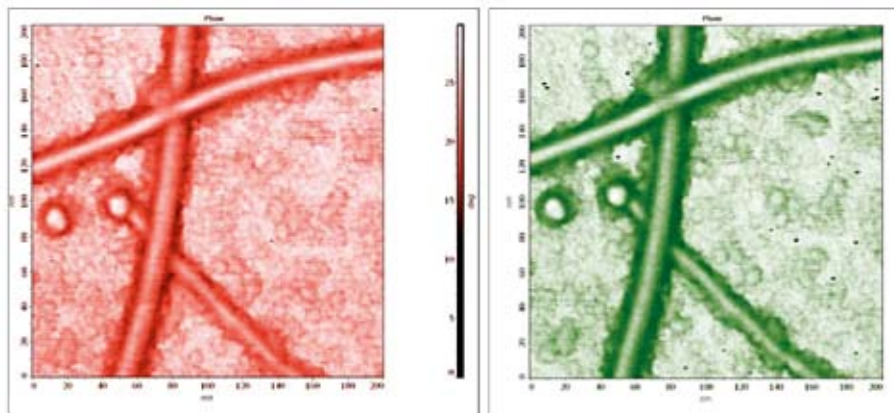
Важно выделить главное в современном этапе развития ТАТ.

## «Сверху вниз»

Существует два принципиальных подхода к ПАТ. Первый предполагает наличие прибора, который позволяет взять атом «правильного» вещества, перенести его в «правильное» место и «правильно» вставить в конструкцию из других атомов, которые уже находятся в этом месте. Это сборка «сверху вниз». Главное преимущество такого подхода в его контролируемости — вся структура наноразмерного устройства спланирована заранее, положение и свойства каждого атома известны. Недостаток производства «сверху вниз» — его высокая стоимость.

С точки зрения оборудования — одна из главных трудностей такой технологии — проблема термодрейфов. Разные части прибора по-разному расширяются при нагревании. Даже незначительный нагрев, неизбежно происходящий при работе АСМ, которые наиболее часто использовались при манипулировании атомами, приводит к неконтролируемому смещению зонда относительно подложки на десятки нанометров в час. Если работу можно провести в течение нескольких минут, такой дрейф не представляет проблемы; однако если с одним нанобъектом работать долго, существующий уровень дрейфа станет непреодолимой преградой.

Существует несколько путей решения проблемы: в НТ-МДТ разработан АСМ с уровнем дрейфа <5 нм/ч (ИНТЕГРА Терма) (рис. 1, 2). Кроме конструкторских реше-



**Рис. 2.** АСМ-изображение углеродных нанотрубок. Размер скана 300 x 300 нм. Термодрейф 10 нм за 6 ч. (ИНТЕГРА Терма)



Рис. 3. Многофункциональный сверхвысоковакуумный НТК НАНОФАБ 100 в НОЦ «Нанотехнологии», ТТИ ЮФУ

ний, минимизирующих влияние дрейфа, широко применяются датчики положения зонда, алгоритмы компенсации дрейфов программными средствами.

**Самосборка**

Второй подход к ПАТ — сборка «снизу вверх» — заключается в том, что при определенных условиях атомы сами выстра-

иваются в упорядоченную структуру. Такой путь формирования наноструктур называют самосборкой. Обеспечив необходимые условия и наладив поступление достаточного количества нужных атомов, можно «выращивать» АТ-структуры практически в неограниченных количествах. Например, с помощью самосборки можно вырастить бездефектный кристалл размером в несколько миллиметров (чтобы собрать такую структуру «сверху вниз», понадобились бы тысячи лет).

Недостаток подхода «снизу вверх» — невозможность контролировать судьбу отдельных атомов. Бездефектность кристалла означает, что вероятность появления дефекта весьма мала, однако невозможно предсказать, где этот дефект возникнет. Кроме того, самосборка весьма ограничивает конструкторов в возможностях создания атомарно-точных гетероструктур.

С точки зрения оборудования необходимо отметить два момента.

**Контроль внешних условий.** ТАТ предъявляют повышенные требования к чистоте — для получения надежных результатов манипуляции необходимо проводить в условиях сверхвысокого вакуума, поэтому большие надежды связываются с созданием орбитальных производственных комплексов с возможностью использовать «бесплатный» вакуум.

**Локализация АТ процесса самосборки.** Существует множество способов заставить атомы выстраиваться в определенном месте либо направлении. Например, осаждение из газовой фазы часто происходит преимущественно вокруг неких иницирующих центров. Расположив их заданным образом на подложке, можно ограничить рост образующихся структур именно этим шаблоном.

Другой пример (хотя о ТАТ в этом случае говорить нельзя): рост структуры ограничен небольшой областью, куда локально направляется поток газа-предшественника. Большая точность получается, если осаждение и выстраивание нужных атомов иницируется локальным воздействием — например, импульсом лазера, пучком электронов или ионов. С помощью фокусированного ионного пучка в современной установке НТК НАНОФАБ 100 (рис. 3) можно локализовать осаждение с точностью до нескольких нанометров.

**Совмещение «нано» с «микро» и «макро»**

Третий пласт стратегических задач связан с встраиванием наноразмерных структур



Рис. 4. «Заточка» зонда для атомно-силового микроскопа (АСМ) с помощью ФИП. Изображение типичного зонда до «заточки» (а) и после (б). Образец получен с использованием комплекса НАНОФАБ 100 в лаборатории проф. В.К. Неволина (Московский государственный институт электронной техники — МГИЭТ ТУ)

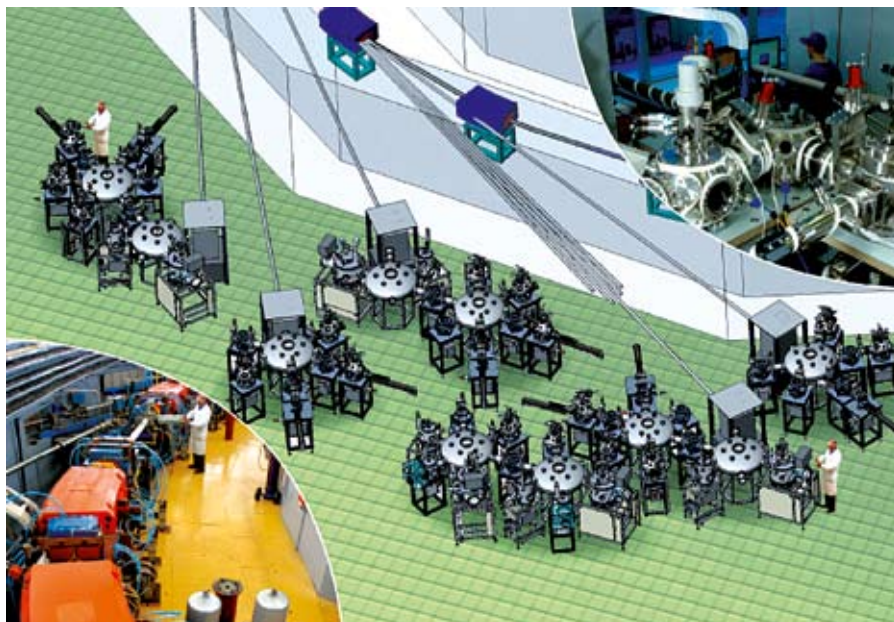


Рис. 5. Проект СУПЕРФАБ — станция нанозлектроники, микро- и наномеханики на источнике синхротронного излучения

и элементов в микро- и макроразмерные конструкции, где необходимо развитие существующих технологий создания элементов нанозлектроники и наномеханики с уменьшением предельно-контролируемых размеров.

Например, фокусированные ионные пучки (ФИП) (рис. 4) — при достаточно высокой энергии могут использоваться для локального травления. Если оборудование обеспечивает трехкоординатное позиционирование образца относительно пучка, с помощью ФИП можно вырезать сложные трехмерные фигуры с характеристическими размерами в десятки нанометров. При более низких токах ФИП может служить инструментом для высокоточной локальной имплантации примесных атомов в структуру кристалла.

Успехи по миниатюризации электронных устройств во многом связаны с разработкой технологий литографических шаблонов с использованием УФ-излучения. Прогресс возможен при переходе к рентгеновскому диапазону, в частности, при применении синхротронного излучения. СУПЕРФАБ (рис. 5) — совместный проект группы компаний НТ-МДТ и РНЦ «Курчатовский институт» — как раз и направлен на интеграцию синхротронного излучения и технологий создания элементов нанозлектроники и наномеханики.

#### Оснащение наноцентров

При разработке и подборе оборудования для НТ ключевая задача на ближайшие годы — интеграция разных методических

подходов. Эта тенденция — комплексирование множества отдельных методов и технологий, очевидно, будет доминировать и при разработке оборудования для исследований и производства с АТ.

В качестве примера можно отметить организацию платформы НАНОФАБ 100, разработанную для интеграции как можно большего числа технологий — существующих и тех, которые могут появиться (рис. 6).

Центральный элемент платформы — сверхвысоковакуумный робот-раздатчик (рис. 7), осуществляющий операции по складированию образцов и распределению их по технологическим модулям. Модули, в каждом из которых осуществляется тот или иной технологический цикл, соединены с центральным роботом через затворы, причем нарушение вакуума в отдельном модуле (по технологической необходимости или во время ремонта) не сказывается на всей остальной системе. Несколько модулей вместе с центральным роботом-раздатчиком составляют кластер; нанотехнологический комплекс может состоять из одного или нескольких кластеров с общей транспортной системой.

В целом перспективы ближайших 15–20 лет можно представить следующим образом.

Совершенствование кластерных нанотехнологических комплексов, интегрирующих максимально широкий спектр ТАТ и сопряженных с ними подходов, уже в ближайшие 5–10 лет приведет к заметному прогрессу в сфере нанотехнологий. Широкое распространение, по-видимому, будет иметь небольшие по производительности, но максимально гибкие в выборе методов исследовательские платформы с возможностью мелкосерийного производства, поскольку значительную долю продукции с использованием ПАТ все-таки будут составлять поисковые и пилотные разработки. Интеграция отработанных решений на уровне массовой продукции приведет к ломке привычных стереотипов, следствием чего станет масштабная перестройка всех основных отраслей промышленности.

Будем надеяться, что эти изменения будут происходить постепенно и достаточно плавно, чтобы люди успели к ним привыкнуть и субъективное восприятие большинства из них можно было бы охарактеризовать словами: «Моя жизнь, действительно, стала лучше!»



Рис. 6. НТК НАНОФАБ 100: модули FIB Implant+SEM+SIMS



Рис. 7. НТК НАНОФАБ 100: транспортный модуль 6-позиционного робота