



# Нано и само

Л. Хатуль

## Так ли это важно и интересно?

Открыв любое издание, пытающееся немного поговорить о чем-то научном, мы натываемся на слова с приставкой «нано-». Нанотехнологии, нанотехника, наномедицина и т. д. Посулы то излечения от всех болезней, то вечной жизни. А то, естественно, страшилки о порабощении человечества. Половина материалов начинается со ссылки на великого Ричарда Фейнмана, который в 1960 году что-то там предсказал, три четверти статей кончаются призывом к выделению денег (естественно, государством) на исследования. Что здесь — очередной самоподдерживающийся процесс самопиара, а что — действительно нечто важное и интересное?

Когда употребляется приставка «нано-», речь идет о чем-то маленьком: это означает  $10^{-9}$  чего-то — метра, секунды, килограмма и т. д. Чаще всего имеется в виду маленький размер. Поскольку человек имеет размер, как сказал бы физик, «порядка

метра» (биолог в этом месте саркастически добавляет: «И форму, близкую к шару», — не подозревая, как он близок к истине), поэтому все, с чем *Homo sapiens* имеет дело, должно быть тех же размеров. Калькуляторы в наручных часах не могли стать ничем, кроме игрушек, — не все носят с собой зубочистки, чтобы нажимать на кнопки. А если человек в миллиард раз больше чего-то, то это «что-то» может быть интересно человеку, только если его будет много. Это — принципиально важный тезис, втихомолку осознаваемый большинством тех, кто работает в данной области, но недоступный журналистам. Зато их язык богато украшен словами-заклинаниями: стратегический, приоритетный, новейший, национальный, четко заданный, сверхпрочный, сверхточный, практически достигнутый, глобальный, ошеломляющий, фундаментальный и т. д.

Возможен, впрочем, и такой вариант: людям в ходе эволюции уменьшиться в размерах в тысячи и миллионы раз, но этот вариант уже рас-

смотрен Станиславом Лемом, и, не желая ступать на скользкую дорожку плагиата, мы пойдем другим путем.

## Как сделать много

Существует несколько способов сделать много чего-то. Два из них философы назвали бы их качественным и количественным, а экономисты — интенсивным и экстенсивным. Первый — это увеличение производительности устройства для изготовления (станка) и увеличение количества станков. По этому пути идет человечество, изготавливая гайки, винты и пули. Второй способ — это создать нечто такое, что будет одновременно производить «целевой продукт» и себе подобных. Третий способ — создать саморазмножающийся станок, который выпускает и винты, и новые работоспособные станки. Заметим, что одного процесса самовоспроизводства недостаточно — станок должен выдавать продукцию. Здесь есть место для некоторых философских спекуляций типа «человек — это самовоспроизводящийся



станок, но где продукт?». И возможно, душевные метания некоторых людей и поиск своего конструктора связаны как раз с тем, что они живут, не понимая, что они создают...

Идеальный пример второго способа производства одинаковых объектов в большом количестве — биологическое оружие. Боевая бактерия (размножающийся станок), попав в питательную среду — организм человека, — начинает производить и токсин, который является целевым продуктом, и новые бактерии — станки для производства токсина. Причем при разработке биологического оружия в СССР ставилась и была решена задача достижения уровня вирулентности в одну бактерию, то есть одна бактерия, попав в организм, должна была успешно инициировать процесс.

Вот еще способ: групповые технологии, когда один, и не самовоспроизводящийся, а обычный, станок производит одновременно много объектов. По этому пути пошла полупроводниковая техника, именно этой идее мы обязаны компьютерами и всему, что с ними

связано, — попробуйте без групповых технологий наклепать миллионы транзисторов на чипе. Итак, мы пришли к трем типам производства — индивидуальному, групповому и самовоспроизводству. По эффективности индивидуальное производство явно проигрывает двум другим. Это не означает, что индивидуальное производство пора хоронить, но надо ясно понимать, что если перемещать атомы зондом микроскопа, то скорость производства останется маленькой. Даже если всю сушу Земли заставить микроскопами.

### Главный вопрос Чапаева: «Где?»

Помнится, на этом вопросе «заострял внимание» Василий Иванович, когда учил слушателей тактике. Большинство же современных популярных публикаций на нанотему состоит из восторгов по поводу того, как «ученые манипулируют отдельными атомами», но вопрос «где?» в них обходится. Между тем ящика с гайками и болтами недостаточно: монтажник, будь то про-

стой рабочий, сидящий на консоли на высоте 300 метров и собирающий небоскреб, или изящная девочка на полупроводниковом производстве, знает где и знает куда. То есть каждая деталь — независимо от ее размеров — должна оказаться на определенном месте. Поэтому, если и можно наладить групповое производство или даже производство отдельных деталей с фантастической скоростью, это не решит проблему. В конце концов, нанокластеры, фуллерены и нанотрубки люди научились производить распылением с довольно большой скоростью, но для многих применений принципиально важно, где именно находится нанокластер или нанотрубка. Есть, однако, случаи, когда это не имеет значения. Например, в композитном материале в некоторых случаях можно расположить элементы любым способом и свойства материала не изменятся. В таких ситуациях групповые технологии без точного позиционирования — например, выращивание nanoострий для автоэлектронных катодов — и распыление кластеров для производства



композита вполне могут закрыть проблему. Или, например, напыление тонких пленок — при толщине в несколько атомов это вполне может считаться нанотехнологией, но расположение конкретных атомов в данном случае значения не имеет. Нужно только четко и ясно представлять себе будущую биографию нашего продукта и не вводить в заблуждение читателя. Если изделие не должно быть впоследствии помещено на место с точностью в десяток нанометров, то, скорее всего, основной проблемой является скорость изготовления. Если же точное позиционирование потребуется, то проблема скорости изготовления — не единственная и, возможно, не основная. Собственно говоря, можно было бы всю нанотехнику разделить на две области: хаотическая и детерминированная.

## Вещь, знай свое место!

Итак, предположим, что нам надо расположить на поверхности некоторое количество каких-либо элементов, причем не важно каких. И расположить по возможности точно. Например, сначала разместить транзисторы, а потом к ним что-то присоединить, причем к каждому — свое. Строгую периодичность можно получить, воспользовавшись электромагнитной или звуковой стоячей волной. Способов конкретного решения проблемы — миллион, например, можно, чтобы максимумы волны инициировали химическую реакцию, но важен не способ. Важно, что есть эталон периодичности. Однако во-первых, на длину волны влияют свойства среды (не в вакууме, чай, живем), а во-вторых, от одной операции до другой частота генератора может «уйти». На это возразят, что частота «стандартов частоты» поддерживается ныне с такой точностью, что никаких нулей после запятой не хватит. А мы ответим, что если на десятисантиметровом чипе располагать десятиангстремные элементы, то потребуются относительная точность не менее  $10^{-9}$  (0,1 линейного размера элемента). А это уже не самая простая проблема. Но все же способов обеспечить периодическое расположение элементов существует множество, и среди них есть весьма изящные. Например, при сколе под малым углом на поверхности образуются периодические атомные ступени. Но все эти способы упираются либо в природную периодичность — например, период решетки, либо в точность поддержания некоего искусственного параметра. Этот параметр

(в приведенном примере — угол скола) задается человеком, и потребности нанотехники не могут быть обеспечены точностью его поддержания. Особенно с учетом естественной насыщенности техники.

На каком-то промежуточном этапе, для какой-то определенной задачи и т. п. точности может и хватить. Но, рассуждая о перспективе, можно положить только на два способа обеспечения точности положения. Первый — с опорой на природные точные периодичности, связанные со свойствами атомов (например, на постоянную решетки). Второй — когда не человек решает, где должен располагаться очередной элемент, а сам процесс, ранее создавшиеся элементы, сама система. Мы добрались до принципа самосборки, которым уже сколько-то миллиардов лет действует природа. Используется для этого технологического приема еще и термин «самоформирование».

## Новое — не забытое старое

Собственно говоря, мы ничего не изобрели. Именно так действует полупроводниковая технология, и даже не придумывая для этого новых слов. В обычном технологическом процессе некоторые стадии происходят под управлением человека (например, засветка пластины через маску), а некоторые — под «управлением» самого процесса. Например, вся пластина окунается в травитель, но протравливаются те места, где ее свойства уже отличаются от свойств соседних мест. Разумеется, самая первая операция на новенькой и чистой пластине должна делаться под управлением человека.

По мере движения технологии в сторону все меньших размеров элементов операции с «ручным управлением» отмирают. Потому что совмещать маски с нанометровой точностью невозможно, а индивидуально обрабатывать электронным или ионным лучом — вечности не хватит. Техника пришла к выводу о необходимости самосборки, как это давно сделала природа.

## Проблема больших периодов

Шаг решетки для большинства веществ лежит в довольно узких пределах — это 0,3–0,6 нм. Технологическим могут потребоваться существенно большие величины. Можно, конечно, измерять портновским метром расстояние от Москвы до Санкт-Петербурга, но есть и более удобные методы. Возьмите две расчески, приложите одну к дру-

гой и посмотрите сквозь них на свет. Вы увидите периодические широкие темные полосы. Это одномерный аналог так называемых муаровых узоров. А если мы сложим вдвое кусок капрона, увидим двумерный муар.

Теперь представим себе, что на материал с одним определенным шагом решетки мы нанесли один слой атомов материала с другим шагом. Нанесенные атомы, скорее всего, подчинятся подложке и расположатся свойственным ей способом. Возможно, подчинится и второй нанесенный слой. Но рано или поздно наносимый материал перестроится в свою решетку, а в переходном слое возникнут механические напряжения. В результате нанесенный слой может разорваться на небольшие участки, размер которых зависит от рассогласований решеток и силы межатомных связей (на языке больших объектов — от прочности и модуля Юнга). Размер этих участков будет значительно больше межатомных расстояний (как и полосы в муаровых узорах значительно больше периода нитей в исходных тканях), но он будет от них зависеть. И хотя флуктуации размеров конкретных участков возможны, их количество будет выдерживаться точно. А при малых размерах будет точно выдерживаться и сам размер.

Поскольку мы уже не один раз произнесли слова «как это делает природа», обратимся к ней еще раз.

## Наномонтажник с наноключом

В природном технологическом процессе нет напылений, засветок фоторезиста и травлений. В природе сборка сложных молекул производится путем перемещения атомов или фрагментов молекул, причем само перемещение делается молекулами-посредниками. Можно сказать, что действия этих молекул похожи на действия монтажника-человека, можно возразить, что мы вынуждены описывать действия этих молекул на кухонном языке потому, что плохо знаем физику. Но факт налицо: в статьях про нанотехнологии сразу после Фейнмана обычно вспоминают Дрекслера с его книгой «Машины творения», в которой он, видимо будучи вдохновлен этой моделью, и предсказал создание микромашин, которые будут делать то, что мы захотим, причем поатомно. Идея была для того времени вполне революционная, но сейчас мы понимаем, что важна еще и производительность.

Что же касается собственно наномашин, то определенное продвижение на этом пути имеется. Например, созданы

молекулярные устройства, преобразующие колебания кислотности среды или освещенности в перемещение атомов. Можно приспособить для изготовления наноматериалов природные наномашинки — вирусы. Конечно, внутриклеточные «наномашинки», например те, что синтезируют АТФ за счет разности концентрации ионов по разные стороны мембраны, или конвейерные сборщики рибосом, выглядят изощреннее. Но, опять же, природа конструировала эти чудеса намного дольше, чем человек — свои машинки.

## Три карты, три карты...

Задачи, стоящие перед «нанотехнологиями с позиционированием», можно разделить на три группы. Первая, самая понятная, группа — это задачи микро-, то есть наноэлектроники. Транзисторы еще меньше, память еще больше, объем диска — еще громаднее. У наносхем все должно быть на своем месте. Насчет схем с хаотическим расположением элементов распространяться не будем — в основном эта идея упоминается в фантастике, которую по традиции все еще называют научной.

Вторая группа задач — это задачи биологические. Вроде ремонта клеток, состригания бляшек в кровеносных сосудах и тому подобного. Вещи эти все пока что вполне фантастические. Не исключено, однако, что на пути нанотехники будут синтезированы вполне обычные вещества, которые окажутся эффективными средствами от некоторых болезней. Собственно говоря, больному без разницы — лечит его вещество, созданное нанометодами (но само действующее традиционно — химически), или «существо», действующее нанометодами. Тем более что и граница-то эта не вполне четкая. Журналисты, украшая свои статьи рисунками этих подводных лодок со жвалами, отгрызающими бляшки, только зря пугают читателя. Молекулу, действующую «нанометодами», изобразить вообще невозможно — у нее нет «вида» в обычном понимании.

Причем первые две группы задач отчасти соприкасаются — нанобиологию можно использовать и в наноэлектронике, физика это не запрещает, и первые результаты в этом направлении уже есть. Надо только понимать, что дорога от первых результатов до продукта на прилавке может оказаться и длинной. Например, топливные элементы на метаноле для сотовых телефонов и ноутбуков — и выгода огромная, и рынок немереный, и сколько раз уже стоял крик: «Практически реализовано!» — а на прилавке пока, увы, нет...

Третья группа задач для нанотехнологий — самая интригующая. Есть применения, связанные с оперированием отдельными атомами, — так называемые квантовые вычисления. Вещь это наиболее загадочная и наиболее многообещающая. Хорошо бы нам научиться отличать многообещание по сути от многообещания ввиду загадочности.

## И вообще — что такое вычисления?

В обычном понимании вычисления — это операции с символами, в том числе с цифрами. В некоторых случаях задача явно ставится в такой форме («преобразовать данное выражение», «найти скорость данного тела»). В ряде ситуаций задача формулируется иначе, но она — и условия, и ответ — может быть более или менее простым путем приведена к символьному и числовому виду. Например, граф или лабиринт легко представить в виде списка вершин и связей, а путь в нем — перечнем вершин. Формально представить решение в виде символов можно всегда, ибо решение — это информация, но во многих случаях это представление носит совершенно формальный, с точки зрения человека — бессмысленный, характер.

Что имеют в виду, когда говорят о ДНК-вычислениях (модное словечко)? Молекулы ДНК действуют, причем могут действовать управляемо: с помощью других молекул их можно резать, сшивать, копировать, обменивать части на части других молекул. То есть с ними можно осуществлять молекулярные операции. Поскольку ДНК — это полимер из мономеров четырех типов, то есть последовательность символов (Т, Ц, Г, А), то любым операциям с ДНК можно поставить в соответствие операции с последовательностями символов.

Немедленно возникает вопрос: обладает ли эта система полнотой, достаточной для универсальности, то есть можно ли посредством ДНК-операций изобразить машину Тьюринга и тем самым реализовать любой вычислительный алгоритм? Ответ на этот вопрос известен (Э.Шапиро, 2001), и он

положителен. Разумеется, работает такой компьютер медленнее самой медленной во Вселенной черепахи. Для некоторых задач найдены специальные ДНК-алгоритмы. Например, для поиска пути на графе (Л.Эйдельман, 1994) — это был первый ДНК-алгоритм. Но все равно создание ДНК-вычислителя, способного заменить обычный компьютер, маловероятно. И никакие разговоры о «чудовищном параллелизме», который возникает, когда в пробирку наливают раствор ДНК, не имеют отношения к делу. В параллельных вычислительных системах разные элементы делают разные операции или одинаковые — но над разными объектами!

Скорее всего, ДНК-вычисления послужат не для собственно вычислений, а для сборки наноконструкций. Применение парадигмы вычислений позволит, с одной стороны, легче понять, что именно происходит в пробирке, с другой же — применить большой и мощный математический аппарат. Вот что пишут об этом исследователи из Института прикладной математики им. М.В.Келдыша — Г.Г.Малинецкий, Н.А.Митин и С.А.Науменко: «В идеальном варианте свойства, алгоритм поиска и алгоритм синтеза (сборки) описываются на языке для ДНК-вычислителя. Затем «программа» выполняется, в результате получается нужное вещество. Несмотря на то что этот процесс в точности напоминает описанный писателями-фантастами, современная наука близка к его осуществлению».

В заключение можно отметить следующее. Человек — часть природы, и как мы от природы ни изолируемся, но все равно мы носим ее внутри себя. В технике же интерес к природе возрастает время от времени. Мы с вами еще помним расцвет бионики в начале второй половины прошлого века. Похоже, что мы сейчас находимся в начале второго такого периода. По крайней мере, в области нанотехнологий.

